



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI - UNIVATES

CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

**MODELAGEM E ANÁLISE DAS ÁREAS SUSCETÍVEIS A
MOVIMENTOS DE MASSA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO FÃO,
A PARTIR DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS**

Taísa Flores

Lajeado, junho de 2018

Taísa Flore

**MODELAGEM E ANÁLISE DAS ÁREAS SUSCETÍVEIS A
MOVIMENTOS DE MASSA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO FÃO,
A PARTIR DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS**

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Curso II, do Curso de Engenharia Ambiental, da Universidade do Vale do Taquari - UNIVATES, como exigência parcial para obtenção do título de Bacharela em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Me. Rafael Rodrigo Eckhardt

Lajeado, junho de 2018

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Célio e Eliane, por todo suporte, apoio e educação que sempre me proporcionaram ao longo da vida, e ainda mais com o nascimento da Valentina.

À minha filha, Valentina, que mesmo tão pequena me ensina todo dia, e me impulsiona a ser uma pessoa melhor sempre!

Ao Professor Dr. Guilherme Garcia de Oliveira pelo apoio, disposição, confiança, paciência e todo ensinamento que me proporcionou. Muito, muito obrigada!

Ao Professor Ms. Rafael Rodrigo Eckhardt pela prestatividade e paciência dispostas para a elaboração deste trabalho.

Aos amigos, colegas e demais professores que estiveram comigo ao longo destes seis anos, e principalmente neste último ano, me escutando e apoiando de forma incansável.

E, por fim, agradeço à Deus por sempre ter me proporcionado novos dias, permitindo seguir com força, mesmo frente aos momentos de maior dificuldade.

RESUMO

Em janeiro de 2010, a região que compreende a bacia hidrográfica do Rio Fão, integrante do Sistema Taquari-Antas, no Estado do Rio Grande do Sul, sofreu com a ocorrência de eventos climáticos extremos, os quais propiciaram a ocorrência de sequenciais movimentos de massa em encostas da região. Diversos setores localizados nessa bacia hidrográfica foram afetados por enxurradas de grande magnitude, com precipitações acumuladas que superaram 250 mm em menos de 24 horas. Além da intensa precipitação, verificou-se o surgimento de grande número de cicatrizes nas encostas, marcadas também pela amplitude dos eventos, alteração da paisagem, destruição e prejuízos. Assim, o objetivo do presente trabalho foi a modelagem e análise das áreas suscetíveis aos movimentos gravitacionais ou de massa, sendo a área de estudo a bacia hidrográfica do Rio Fão, no Rio Grande do Sul. Foram coletados dados *in loco*, como observações em campo, informações de moradores locais e análises de imagens defasadas no tempo, disponíveis no Google Earth Pro. O processo de modelagem se deu a partir da utilização de redes neurais artificiais (RNA), onde testou-se 90 configurações diferentes do modelo, divididas em 9 etapas. Inicialmente utilizou-se onze variáveis de entrada, e com o uso do algoritmo retropropagativo, a variável de menor influência no modelo foi cortada para a etapa seguinte, além disso houve também a variação de neurônios na camada oculta. Ao final identificou-se 121 cicatrizes decorrentes de movimentos de massa na região, tendo uma área total equivalente a 27,3 hectares. Gerou-se um mapa de suscetibilidade da área de estudo, dividindo o mesmo em quatro classes de suscetibilidade, sendo elas: baixa, média, alta e muito alta suscetibilidade, e com base em cada classe foram expostas diretrizes para o uso e ocupação da terra.

Palavras-chave: Geoprocessamento; Fluxo de detritos; Desastres naturais.

ABSTRAC

In January 2010, the region comprising the Fão River Basin, a member of the Taquari-Antas System, in the State of Rio Grande do Sul, suffered from the occurrence of extreme climatic events, which led to the occurrence of sequential landslides on slopes of the region. Several sectors located in this watershed were affected by large-scale floods, with cumulative rainfall exceeding 250 mm in less than 24 hours. In addition to intense precipitation, a large number of scars appeared on the slopes, also marked by the amplitude of the events, landscape alteration, destruction and losses. Thus, the objective of the present study was the modeling and analysis of the areas susceptible to gravitational or landslides, the study area being the Fão river basin, in Rio Grande do Sul. Data were collected in loco, such as field observations, local information and time-lagged image analysis available in Google Earth Pro. The modeling process was based on the use of artificial neural networks (ANNs), where 90 different configurations of the model were tested, divided into 9 phases. Initially, it was used eleven inputs, and using backpropagation algorithm, the variable with the least influence in the model was cut to the next step. In addition, there was also the variation of neurons in the hidden layer. At the end, 121 scars from landslides in the region were identified, has a total area of 27.3 hectares. A susceptibility map was generated from the study area, dividing it into four susceptibility classes: low, medium, high and very high, and based on each class, guidelines were set for land use and occupation.

Keywords: Geoprocessing. Debris Flow. Natural Disaster.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Eventos extremos responsáveis pela geração de desastres	21
Figura 2 - Danos causados pela ocorrência de rastejos	27
Figura 3 - Ilustração de quedas livres e em planos inclinados.....	28
Figura 4 - Movimento do tombamento de blocos.....	29
Figura 5 – Ocorrência de corridas de detritos.	30
Figura 6 – Caracterização de um escorregamento.	31
Figura 7 – Esquema de escorregamento rotacional.....	32
Figura 8 – Ilustração de escorregamento planar	33
Figura 9 – Ilustração de escorregamento de cunha	34
Figura 10 – Fluxograma das etapas do estudo	43
Figura 11 - Mapa de localização da bacia hidrográfica do Rio Fão.....	44
Figura 12 – Evolução das redes neurais artificiais a cada e tapa e sub etapa.....	50
Figura 13 – Identificação de cicatrizes originadas por deslizamento de massa e acúmulo de detrito no rio	54
Figura 14 - Cicatrizes decorrentes de movimentos de massa verificadas em campo	56

Figura 15 – Cicatrizes decorrentes de movimentos de massa verificadas em campo	57
Figura 16 – Mapa de suscetibilidade a movimento de massa, a partir do índice de critério de Akaike (AIC)	64
Figura 17 – Detalhamento da área com presença de cicatrizes de movimento de massa a partir do AIC.....	65
Figura 18 - Mapa de suscetibilidade à movimento de massa a partir da acurácia (AUC)	66
Figura 19 – Detalhamento da área com presença de cicatrizes de movimento de massa a partir da AUC.....	67

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais atividades antrópicas agravantes de desastres.	22
Quadro 2 - Principais características de cada tipo de movimento de massa recorrente no Brasil.....	25
Quadro 3 – Tipos, níveis e escalas utilizáveis na elaboração de zoneamento de áreas suscetíveis a deslizamento.....	35
Quadro 4 - Diretrizes para utilização do solo da bacia hidrográfica do rio Fão, de acordo com cada classe de suscetibilidade.	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características dos desastres naturais considerados na elaboração de pesquisas científicas.....	16
Tabela 2 – Classificação dos desastres, relacionando-os à intensidade	18
Tabela 3 – Graus de suscetibilidade e respectivas características locais.....	23
Tabela 4 – Frequência de ruptura dos movimentos de massa para cada atributo do terreno.....	59
Tabela 5 – Frequência das cicatrizes dos movimentos de massa para cada atributo do terreno.....	61
Tabela 6 – Características das configurações selecionadas.....	62
Tabela 7 – Relação entre a área total dos municípios e as áreas suscetíveis a movimentos de massa na bacia hidrográfica do Rio Fão.....	68

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Cálculo de entrada e saída de uma RNA.	51
Equação 2 – Critério de Informação de Akaike.	51

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 Objetivos	14
1.1 Objetivos	14
1.1.1 Objetivo geral	14
1.1.2 Objetivos específicos.....	14
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
2.1 Eventos extremos e desastres.....	15
2.1.1 Classificação dos desastres naturais.....	27
2.1.2 Eventos naturais causadores de desastres	21
2.1.3 Suscetibilidade aos desastres naturais	22
2.2 Movimentos de massa	24
2.3 Métodos e aplicações de análise de suscetibilidade a movimentos de massa	35
3 METODOLOGIA	42
3.1 Materiais, dados e softwares.....	43
3.2 Área de estudo.....	44
3.3 Métodos.....	46
3.3.1 Inventário de cicatrizes de movimento de massa	46
3.3.2 Extração de atributos do terreno	47
3.3.3 Modelagem de áreas suscetíveis a movimento de massa	48
3.3.4 Elaboração do mapa de suscetibilidade a movimentos de massa	52
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	54
4.1 Inventário de cicatrizes de movimento de massa	54
4.2 Análise morfométrica das áreas de ocorrência de movimentos de massa	58
4.3 Modelagem de áreas suscetíveis a movimento de massa.....	62
4.4 Elaboração dos mapas de suscetibilidade a movimentos de massa, análise das áreas suscetíveis e diretrizes para uso e ocupação local.....	64
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	72
REFERÊNCIAS.....	75

1 INTRODUÇÃO

O planejamento municipal indevido, ou mesmo a sua falta, relacionado à ocupação territorial, acaba potencializando a ocorrência de desastres naturais, devido à utilização desordenada de áreas que possam apresentar algum grau de suscetibilidade. Esse cenário torna-se ainda mais grave quando são analisados países em desenvolvimento ou em expansão demográfica.

Em muitos casos é possível verificar a ligação entre as famílias com baixo poder aquisitivo alocadas em regiões suscetíveis, não dispondo assim de outras alternativas para a habitação. Outras vezes, a busca de vantagens, como por exemplo recursos hídricos, também ocasiona a instalação de moradias em lugares pouco propícios, com condicionantes geológicos e geomorfológicos desfavoráveis.

Com a finalidade de possibilitar a instalação de novas residências ou empreendimentos, a construção de vias de acesso às propriedades ou a realização de corte e aterros frequentes leva à supressão vegetal do terreno, bem como à movimentação do solo. Tais modificações, além da deposição irregular de resíduos sólidos, alteração do regime de escoamento pluvial e das infiltrações no solo, resultam na redução das condições de estabilidade do

terreno, colaborando com a ocorrência dos movimentos gravitacionais, processos de erosão e outros desastres naturais.

Além das alterações antropogênicas, precipitações pluviométricas anômalas em intensidade ou em concentrações pontuais podem propiciar os desastres, os quais podem ser definidos como eventos adversos que podem causar danos humanos, materiais e ambientais, além de prejuízos socioeconômicos. Caracterizam-se como desastres: inundações, secas, furacões e movimentos de massa, entre outros (KOBIYAMA et al., 2006).

Em sua maioria, os desastres ocorrem de forma inesperada, ocasionando danos severos à sociedade, resultando muitas vezes em mortos e feridos. Dessa forma, ações que objetivam à prevenção ou mitigação das áreas atingidas são importantes, envolvendo de forma conjunta setores governamentais e privados.

Em escala mundial, no intervalo entre os anos de 2001 e 2017, cerca de 1,5 bilhões de pessoas foram atingidas por inundações, enxurradas ou movimentos de massa, em um total de 3.084 ocorrências. Dessas, cerca de 297 mil representaram pessoas feridas e aproximadamente 106 mil foram óbitos, além de envolverem prejuízos financeiros da ordem de U\$\$ 480 bilhões. No mesmo período, no Brasil, aproximadamente 7 milhões de pessoas foram afetadas, com pelo menos 2.500 óbitos e prejuízos financeiros que ultrapassam R\$ 19 bilhões (EM-DAT, 2018).

Dois eventos de grande proporção envolvendo movimento de massa podem ser citados no Brasil. O primeiro, ocorrido no vale do Itajaí, em Santa Catarina, no ano de 2008, onde chuvas contínuas por mais de 60 dias desencadearam movimentos gravitacionais de massa e consequentes enxurradas, assolando diversos municípios. Mais de 1,5 milhões de pessoas sofreram com os danos e aproximadamente 120 óbitos foram registrados (BALZA, 2008).

Eventos da mesma natureza atingiram o estado do Rio de Janeiro nos anos de 2010 e 2011, quando precipitações intensas resultaram em grandes movimentos de massa na região serrana do Estado, resultando em enxurradas. Ao todo, entre abril de 2010 e janeiro de 2011, foram contabilizados mais de 1.100 óbitos, 50.000 desabrigados, 300 de desaparecidos e cerca de 1 milhão de pessoas afetadas (DOURADOS; ARRAES; SILVA, 2012).

Com enfoque nas ocorrências de movimento de massa, em escala estadual, de acordo com a Defesa Civil do Rio Grande do Sul (2018), de 2015 a 2017 foram realizados cerca de 30 registros contemplando alertas e ocorrências em diversas regiões. Cidades como Caxias do Sul, Fontoura Xavier, Santa Maria e Novo Hamburgo, entre outras, foram atingidas por esse tipo de desastre.

Os movimentos de massa são originados principalmente, por eventos extremos de precipitação, que também podem acabar gerando inundações ou enxurradas. Uma das regiões atingidas frequentemente por eventos extremos dessa natureza é a bacia hidrográfica dos rios Taquari-Antas, localizada no interior do Estado do Rio Grande do Sul. Segundo Ferri e Togni (2012), essa região chega a ter a ocorrência de mais de um evento extremo por ano, resultando em desastres locais e grandes danos à população.

Na bacia hidrográfica do Rio Fão, um de seus principais afluentes, a situação com relação a tais ocorrências não difere. O que distingue a bacia do Taquari-Antas da Bacia do Fão, é o próprio vale do rio que, no caso do Taquari, apresenta uma resposta mais lenta em episódios de chuva extrema e, conseqüentemente, o seu nível também aumentará lentamente, variando pouco a cada hora. Isso se deve à maior superfície da bacia e a seu elevado tempo de concentração das águas, determinando inundações graduais (DA CAS, 2015).

Por sua vez, após a ocorrência de precipitações extremas, a bacia do Rio Fão tende a uma resposta quase que imediata, concentrando maior volume de água e elevação rápida do seu nível, determinando a ocorrência de inundações bruscas ou enxurradas. Isso ocorre também pelo fato de a região possuir

encostas com alta declividade, colaborando com a ocorrência de movimentos de massa.

Pode-se considerar movimento de massa qualquer movimentação de solo, havendo variação quanto ao volume e velocidade com que ocorre (GERSCOVICH, 2012). Nessa linha, tem-se vários estudos sobre a classificação dos movimentos de massa: Varnes (1958 e 1978); Hutchinson (1968); e Guidicini e Nieble (1993), sendo as obras do primeiro autor com a maior utilização.

Os movimentos de massa, juntamente com as inundações e enxurradas, constituem os desastres de maior representatividade quanto ao grau de recorrência em escala mundial. A quantidade de registros que envolvem a ocorrência de movimento de massa supera outras ameaças naturais, tais como, furacões e vulcões (RIFTEL; GUASSELLI; BRESSANI, 2016). Além disso, a ocorrência desses desastres tende a aumentar em lugares com problemas de estabilidade de encostas ou em encostas com altas inclinações.

Em janeiro de 2010, houve a ocorrência de um evento climático de grande amplitude com reflexos não só na região da bacia dos rios Fão e Forqueta mas, também em outras áreas do Vale do Taquari e do Rio Grande do Sul. A intensa precipitação, iniciada no dia 03 de janeiro, teve seu pico de chuva na madrugada do dia 04, resultando em enxurradas e inundações de grandes proporções em vários pontos, com um acúmulo de precipitação superior a 250 mm em menos de 24 horas. Além da intensa precipitação, em vários locais no entorno do Rio Fão e de seu afluente Arroio Tereza, ocorreram movimentos de massa. Após o evento de janeiro de 2010 foi possível verificar a ocorrência de diversas cicatrizes originadas pela movimentação do solo nas encostas do vale do Rio Fão e seus afluentes.

Embora diversos estudos sobre a suscetibilidade de áreas a movimentos de massa já tenham sido realizados em diferentes países (Carrara et al., 1991; Ayalew e Yamagishi, 2004; Ramos et al., 2012), no Brasil ainda se tem a

possibilidade de aplicação de diferentes metodologias. A extração de atributos do terreno nos locais de ocorrência de movimentos pode resultar em diversas pesquisas envolvendo movimentos de massa e mapeamento de áreas suscetíveis.

A realização de estudos e respectivos mapas, que evidenciem a suscetibilidade de áreas a movimentos de massa, pode ser realizada utilizando-se diversas técnicas e modelos. As técnicas de modelagem podem ser agrupadas em várias categorias gerais, tais como: mapeamento de risco geomorfológico; análise de inventários de movimentos; métodos heurísticos e modelos matemáticos, físicos ou geotécnicos (Guzzetti et al., 1999).

Dentro dessas técnicas, a utilização de modelos físicos como o Shalstab, modelos matemáticos como redes neurais artificiais (RNA) e técnicas não-paramétricas, incluindo árvores de decisão e *Support Vector Machine*, têm sido amplamente empregados nesse segmento. A utilização específica de redes neurais artificiais no mapeamento de áreas suscetíveis tem grande aplicabilidade, quando se trata de estudos na literatura científica internacional, como Yilmaz (2009), Poudyal et al. (2010) e Chen et al. (2017), apresentando resultados satisfatórios, seja na utilização somente desse modelo ou em conjunção com outros.

Assim, o presente estudo objetiva a utilização de redes neurais artificiais para o mapeamento, estudo e análise de áreas suscetíveis a impactos geotécnicos, particularmente de movimentos gravitacionais ou de massa na bacia hidrográfica do Rio Fão, levando-se em conta os processos ocorridos em passado recente.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é modelar e analisar as áreas suscetíveis a movimentos de massa na bacia hidrográfica do Rio Fão, a partir da aplicação de modelos baseados em redes neurais artificiais.

1.1.2 Objetivos específicos

São objetivos específicos do presente estudo:

- a) Gerar um inventário com o mapeamento e caracterização das cicatrizes resultantes dos processos de movimentos gravitacionais ou de massa na bacia hidrográfica do Rio Fão;
- b) elaborar mapas de variáveis morfométricas do terreno;
- c) realizar a modelagem das áreas suscetíveis aos movimentos de massa com a utilização de redes neurais artificiais;
- d) elaborar um mapa de suscetibilidade a movimentos de massa para a bacia hidrográfica do Rio Fão, com diretrizes para a ocupação local.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Eventos extremos e desastres

Tanto na meteorologia quanto na climatologia, podem ocorrer grandes picos que excedem um estado climático comedido. Essa irregularidade no comportamento climático ou meteorológico é denominada como um evento extremo, que pode variar quanto à sua duração, desde dias até anos. No entanto, eventos extremos de curto prazo acabam assumindo uma importância significativa à sociedade, devido aos grandes danos causados (MARENGO et al., 2009).

A título de exemplo cita-se as inundações, enxurradas, secas, furacões, movimentos de massa, entre outros. Como resultado de eventos extremos tem-se a ocorrência de desastres, que podem ser originados por questões hidrometeorológicas, climatológicas, geotécnicas ou biológicas, resultando em degradação ao meio ambiente natural ou construído (TOMINAGA; SANTORO; AMARAL, 2012).-

Os desastres podem acarretar tanto prejuízos ambientais e humanos quanto socioeconômicos, que acabam comprometendo a capacidade de recuperação do local atingido (MATA-LIMA et al., 2013). Desastres podem ter

origem natural, resultantes dos eventos extremos acima citados, ou mesmo originar-se da interferência antropogênica, mediante a ocupação de áreas suscetíveis e utilização não recomendada do solo ou recurso hídrico, ocasionando um ecossistema vulnerável (KOBIYAMA et al., 2006).

Para a realização de estudos relacionados aos desastres que tenham origem natural, foram propostas por White (1974) cinco abordagens: a estimativa da área de perigo ocupada pela população; a determinação da faixa de ajuste possível contra eventos extremos; a realização de uma análise da percepção da população diante da ocorrência dos desastres; a análise e seleção de processos e medidas adequadas; e a estimativa dos efeitos de interesses políticos sobre essas medidas. Um sexto item foi adicionado por Hewitt (1983), que trata da compreensão de como os aspectos socioeconômicos da sociedade contribuem para a geração de desastres.

Quanto à realização de pesquisas científicas que envolvam desastres, Burton, Kates e White (1993) *apud* Kobiyama et al. (2006), consideraram sete parâmetros para a caracterização dos desastres como naturais, expostos na Tabela 1.

Tabela 1 – Características dos desastres naturais considerados na elaboração de pesquisas científicas.

Característica	Influência
Magnitude	Alta ou baixa
Frequência	Frequente ou raro
Duração	Longa ou curta
Extensão	Ampla ou limitada
Velocidade de ataque	Rápida ou lenta
Dispersão espacial	Difusa ou concentrada
Espaço temporal	Irregular ou regular

Fonte: Burton, Kates e White (1993) *apud* Kobiyama et al. (2006).

Em relação ao tema, Santos (2007) assegura que os desastres de origem natural mais comuns no Brasil têm relação com inundações, enxurradas, secas e movimentos de massa. No entanto, os desastres tornam-se muito mais agressivos dada a interferência humana, em processos como degradação de áreas vulneráveis, desmatamento e ocupação irregular.

A autora ainda aponta que o avanço da degradação ambiental no País, a intensidade nos impactos ocasionados pelos desastres e o aumento da vulnerabilidade humana estão cada vez mais próximos, um influenciando na ocorrência do outro. Além disso, a dificuldade financeira para a aquisição de terras, bem como, a falta de fiscalização por conta dos órgãos competentes faz com que cada ano mais pessoas ocupem áreas de perigo iminente.

Assim, tem-se de forma generalizada e em escala nacional uma espécie de dívida social para com essas pessoas, visto que a grande maioria dos atingidos em desastres possuem um poder aquisitivo baixo. E como resultante dessa menor renda, ocorre consequentemente também um nível inferior de informação, fazendo com que a percepção do grau de vulnerabilidade a que estão expostos não seja perceptível, segundo a Secretaria Nacional de Defesa Civil (BRASIL, 2007).

Reckziegel (2007) enfatiza a ocorrência de desastres no Rio Grande do Sul, apresentando duas linhas de origem: originados por dinâmica superficial ou por dinâmica atmosférica. Os primeiros são ocasionados por eventos como enchentes e inundações de grandes proporções, além de diversos tipos de movimentos de massa, acarretando severos danos materiais à população, além de feridos e até óbitos.

Desastres associados à dinâmica superficial ainda podem contar com a influência antropogênica que, conforme exposto anteriormente em escala nacional, possui ligação com a utilização e ocupação inadequada de áreas

suscetíveis. Em contrapartida, os desastres associados à dinâmica atmosférica não possuem necessariamente a influência humana.

De forma geral, os desastres podem ser classificados com base em diversos fatores, como se verá a seguir.

2.1.1 Classificação dos desastres naturais

Segundo Castro (1999), os desastres podem ser classificados de acordo com a sua intensidade, evolução e origem; já Sidle et al. (2004) caracterizam os desastres de acordo com a sua duração. Se seguirmos a ideia defendida pelo primeiro autor, a classificação pode ocorrer em quatro níveis de intensidade, que variam de I a IV, sendo o primeiro nível o de menor intensidade e o quarto o de maior, consecutivamente. A Tabela 2 a seguir expõe a classificação dos desastres com relação às suas respectivas intensidades.

Tabela 2 - Classificação dos desastres relacionando-os com a intensidade.

Nível	Intensidade	Situação
I	Desastres de pequeno porte onde os danos causados têm baixa relevância e prejuízos financeiros baixos.	Município consegue recuperar com seus próprios recursos.
II	Possui média intensidade, os danos causados têm importância superior ao anterior e acarretam em prejuízos de alguma significância, embora não exageradamente altos.	Com mobilização ativa do município, o mesmo consegue reverter a situação.
III	Grande intensidade, causando danos que necessitam de atenção e originam grandes prejuízos.	Além de recursos municipais, necessita-se de auxílio estadual e federal.
IV	De altíssima intensidade, com impactos de alta significância e prejuízos extremamente altos.	Sem auxílio estadual e federal, o município não consegue recuperar-se, sendo que em alguns casos, necessita-se até mesmo de auxílio internacional.

Fonte: Da autora, adaptado de Tominaga, Santoro e Amaral (2012).

Segundo Castro (1999), para os níveis I e II, os danos causados pelos desastres naturais são recuperados com recursos do município atingido, comprometendo um percentual que pode variar entre 5% e 10% do seu orçamento anual. A partir do terceiro nível, em decorrência da maior magnitude dos danos causados, o município necessita de complementação da verba para a realização da recuperação, advinda da esfera estadual e federal. Nesse caso, compromete-se cerca de 10% a 30% do PIB municipal e, junto a isso, declara-se situação de emergência¹ do município ou região atingida. Para o quarto e último nível, os prejuízos alcançam proporções extremas, comprometendo mais de 30% do PIB municipal, além de declarar estado de calamidade pública²; dessa forma, para que haja a recuperação municipal, necessita-se obrigatoriamente de auxílio externo.

Para haver a caracterização de estado de emergência faz-se um reconhecimento local através do poder público, que avalia a situação como anormal, porém com danos superáveis pela comunidade atingida. A situação de calamidade pública, por sua vez, é também considerada pelo poder público como condição anormal, no entanto os danos e prejuízos causados possuem maior seriedade, colocando em risco inclusive a vida das pessoas atingidas (DEFESA CIVIL, 2017).

A análise dos fatores preponderantes e agravantes no processo de caracterização de situação de emergência e calamidade pública são de extrema

1

Segundo a Defesa Civil, caracteriza-se como situação de emergência o reconhecimento legal, por parte do município atingido, como uma situação anormal provocada por desastres, sendo os danos suportáveis e superáveis pela comunidade afetada. No caso de um município, o prefeito é quem decreta a situação de emergência no momento que achar pertinente.

2

De acordo com a Defesa Civil, o estado de calamidade também tem a necessidade de um reconhecimento legal, pelo município atingido, de uma situação anormal provocada por desastres, no entanto, os danos causados a comunidade têm esfera superior ao anterior, apresentando inclusive risco à vida de seus habitantes.

importância. A Defesa Civil gaúcha aponta como fatores preponderantes aqueles ligados à intensidade dos danos, sejam ambientais ou humanos, além da análise da necessidade e disponibilidade de recursos para a recuperação da situação normal. Já os agravantes relacionam-se à evolução dos desastres e à ocorrência de eventos secundários, como o nível de preparação e eficácia da defesa civil, além do grau de vulnerabilidade ou suscetibilidade em que se encontram as áreas e pessoas atingidas.

Kobiyama et al. (2006) citam que, de forma geral, os desastres que acontecem subitamente, classificados como agudos, originam situações de emergência ou mesmo de calamidade pública. Por sua vez, para os desastres que ocorrem gradualmente, classificados como desastres crônicos, em sua maioria não se fazem necessários os decretos. Isso ocorre devido à possibilidade de uma prevenção perante o desastre, visto que a sua evolução é gradativa, para que os danos e prejuízos possam ser amenizados.

Considerando-se a evolução dos desastres, eles são caracterizados de acordo com sua forma de ocorrência, Há três tipos de desastres: os súbitos, os graduais e os que resultam de um conjunto de processos. Os primeiros ocorrem de forma inesperada, tendo como principal característica a velocidade do processo como um todo. São exemplos as enxurradas e tornados ou mesmo agravantes como movimentos de massa (CASTRO, 1999).

Os desastres graduais são o oposto do modelo anterior, pois o processo ocorre lenta e gradativamente. São exemplos as inundações lentas e as secas. O autor também aponta a conjugação de vários fatores na origem e desencadeamento dos desastres naturais. Nesse caso podem ocorrer acidentes semelhantes e contínuos, ou mesmo um primeiro evento que influencia a ocorrência de um segundo, acarretando um desastre de grande proporção. Como exemplo pode-se citar uma precipitação intensa que desencadeia sucessivos movimentos de massa, que por sua vez podem agravar as enxurradas e/ou inundações de um rio à jusante.

O estudioso defende a ideia da classificação dos desastres segundo sua origem, podendo ser: natural, antrópica e mista. Como origem natural enquadram-se todos aqueles oriundos de fenômenos extremos naturais, não dependendo de ação humana. Em contrapartida, Kobiyama et al. (2006) conceituam desastre natural aqueles que se originam de eventos naturais extremos, influenciados ou não por ações humanas.

Os desastres causados de forma antrópica originam-se por atividade ou omissão humana. Por fim, os desastres mistos são todos os relacionados à atividades irregulares ou irresponsabilidade humana, que intensifique os danos e prejuízos causados por desastre de origem natural. No entanto os desastres dificilmente ocorrem de forma exclusivamente de forma natural, sendo que em quase sua totalidade recebem algum tipo de influência antrópica (CASTRO, 1999).

A classificação dos desastres quanto à sua duração, de acordo com Sidle et al. (2004), pode ocorrer de duas maneiras: esporádica ou crônica. Desastres como terremoto, vulcanismo, tsunami, entre outros, são considerados esporádicos, apesar das magnitudes envolvidas serem elevadas. Desastres crônicos, tais como erosão do solo, geralmente não chamam a atenção da população, mas podem vir a acarretar sérios danos ambientais a longo prazo, como desertificação e assoreamento de rios, podendo resultar em escorregamento de solo ou inundações.

No Brasil costuma-se utilizar a Classificação e Codificação Brasileira de Desastres (COBRADE), é dividida em duas categorias: os desastres naturais e os desastres tecnológicos, possuindo uma subdivisão em cinco grupos. Focando para os desastres de origem natural tem-se: os geológicos, os hidrológicos, os meteorológicos, os climatológicos e os biológicos (BRASIL, 2012).

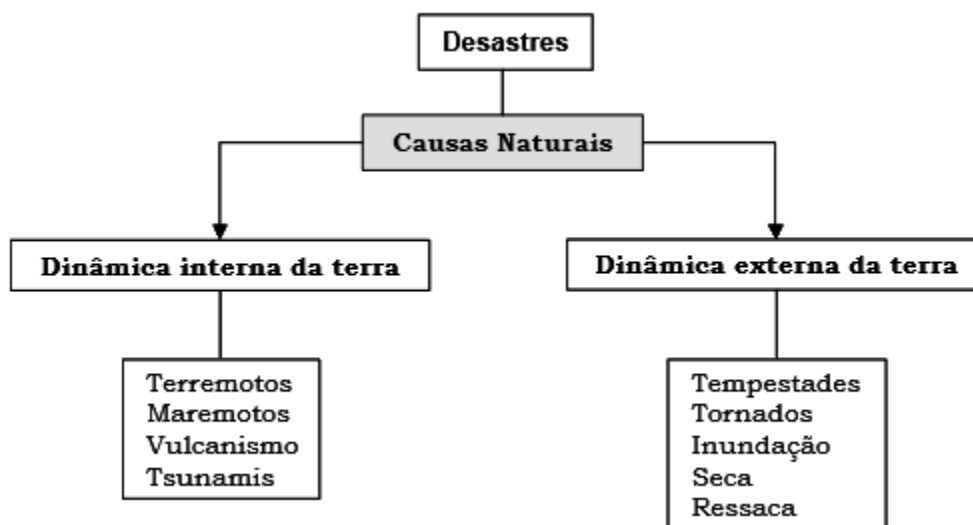
Cada um dos cinco grupos possui outra divisão em grupos ainda mais específicos. No total são treze subgrupos que abrangem desastres como: terremotos, movimentos de massa, enxurradas, temperaturas extremas,

epidemias, entre outros. Além disso, a COBRADE ainda define símbolos para cada desastre, para que se possa identificar as áreas ou regiões que sofrem com as ocorrências (BRASIL, 2012).

2.1.2 Eventos naturais causadores de desastres

Desastres naturais podem relacionar-se a fenômenos internos ou externos da Terra. Como fenômenos internos existem as movimentações de placas tectônicas, que acabam gerando efeitos sobre a superfície terrestre, como em terremotos, tsunamis, entres outros. Os fenômenos de origem externa são gerados pela dinâmica atmosférica, como as tempestades, tornados ou inundações (KOBİYAMA et al., 2006). Na Figura 1 esquematiza-se a gênese dos desastres de origem natural.

Figura 1 - Eventos extremos responsáveis pela geração de desastres.



Fonte: Kobiyama et al. (2006).

Os desastres naturais que ocorrem no Brasil, de forma geral, têm origem externa, sendo as tempestades e as estiagens aquelas que causam maiores prejuízos financeiros. Os movimentos de massa (deslizamentos, rolamentos de matacões, queda de blocos, entre outros) ocorrem com menor frequência, no

entanto, são os responsáveis pelo maior número de óbitos envolvidos (RECKZIEGEL, 2007).

No Quadro 1 estão expostos os principais agravantes oriundos das atividades humanas, bem como, os desastres resultantes.

Quadro 1 – Principais atividades antrópicas agravantes de desastres.

Agravantes antrópicos	Desastres resultantes
Emissões de atmosféricas nocivas	Chuvas ácidas
Supressão de mata ciliar e assoreamento dos rios	Inundações
Impermeabilização dos solos por meio de construções civis (concreto, pavimentação asfáltica, etc.)	Enxurradas
Ocupação irregular de encostas	Movimento de massa

Fonte: Da Autora, adaptado de Kobiyama et al (2006).

O quadro acima evidencia que o homem participa ativamente para que os ambientes construídos sejam afetados por desastres, visto que a ocupação e a utilização de terrenos ocorrem, em muitos casos, de forma irresponsável, potencializando a suscetibilidade natural da área (MATA-LIMA et al., 2013).

2.1.3 Suscetibilidade aos desastres naturais

A suscetibilidade é um conceito ligado à fragilidade natural do meio (SAITO, 2004). Caracterizam-se como áreas suscetíveis aquelas que tenham tendência ao desenvolvimento de um fenômeno ou processos de meio físico (BRESSANI; COSTA, 2013). Algumas características do terreno propiciam os desastres naturais, como os movimentos de massa. Pode-se citar a declividade do terreno, que potencializa esse tipo de desastre nos locais mais íngremes, ainda que não garanta quando ou onde se desenvolverá. Desta forma, a declividade caracteriza-se como um fator que predispõe o desenvolvimento deste tipo de processo, originando-se assim o conceito de suscetibilidade (BITAR, 2014).

Deve-se ressaltar a ideia de suscetibilidade com o tipo de ocupação do solo. Por exemplo áreas que apresentam graus de suscetibilidade, porém não possuem ocupação humana, como residências, empresas, hospitais, entre outros, não apresentariam o mesmo grau de vulnerabilidade que outras com esse tipo de ocupação. Ou seja, áreas que apresentam determinado grau de suscetibilidade, porém não estão sendo utilizadas por parte da sociedade, não necessariamente caracterizam-se como propícias para a ocorrência de desastres, visto que não apresentam vulnerabilidade ou risco à população (CEPED, 2016).

As informações necessárias para a elaboração de estudos da real suscetibilidade das áreas no Brasil, ainda são limitadas (FARAH, 2003). Contudo, alguns estudos já foram realizados, como a elaboração de mapas que identificam áreas suscetíveis, como os feitos por Riffel, Ruiz e Guasseli (2016), Rocha e Schuler (2016), ou mesmo com cartas geotécnicas (BITAR, 2014), onde estão expostos os pontos suscetíveis e a forma adequada de utilização das áreas analisadas.

Evidenciando estudos que abordam a suscetibilidade de áreas a deslizamento de massa, deve-se apresentar um zoneamento da região estudada, onde a classificação seja feita em graus ou classes de suscetibilidade, que variem da menor tendência de ocorrência deste tipo de desastre, para a que possui maior tendência, como as classes expostas na Tabela 3 (SANTOS, 2007).

Tabela 3 – Graus de suscetibilidade e respectivas características locais

Suscetibilidade	Descrição
Baixa	Áreas planas ou com relevo suave, indicando baixa ou muito baixa probabilidade de ocorrência de movimentos de massa, não oferecendo perigo ao uso e ocupação do solo. Geralmente apresentam pouquíssimas restrições com relação a realização de corte ou aterro, ou mesmo fundações. Os problemas originados nesses locais provêm de cortes mal dimensionados ou barramentos excessivos, resultando em erosão ou aumento inadequado da

	declividade do terreno.
Média	São áreas onde as condições do terreno já indicam um grau mediano para a ocorrência de movimentos de massa. Ainda que não se tenha registro de ocorrência desde tipo de fenômeno, a utilização destas áreas pelo homem deve considerar soluções técnicas e medidas de proteção para evitar o reduzir possíveis riscos.
Alta	Nestas áreas as condições naturais do terreno já são altamente condicionantes à ocorrência de deslizamento, apresentando restrições para a ocupação ou realização de quaisquer atividades humanas no solo. Em geral são terrenos que possuem alta instabilidade, tendo a necessidade de projetos técnicos e estudos detalhados, envolvendo obras de engenharia de grande porte e custos elevados. Normalmente contemplam a convivência com algum nível de risco e a adoção de planos de prevenção e reparação de acidentes.
Muito alta	Em geral são áreas impróprias para atividades humanas, onde os terrenos de forma natural são extremamente favoráveis à ocorrência de movimentos de massa. Normalmente possuem altíssima declividade, onde nem grandes obras de engenharia garantem a eliminação dos riscos, sendo que. A utilização destas áreas só é justificada quando se tem a necessidade de implantação de obras de transposição tais como rodovias, linhas de transmissão, entre outros, e tem-se a necessidade da implantação de medidas de prevenção e mitigação contra riscos e acidentes.

Fonte: Da Autora, adaptado de Santos (2007).

Santos (2007) ainda ressalta a importância de se indicar quais os tipos de movimento de massa esperados para determinada área, quando realizada a avaliação da suscetibilidade. Informações como essa podem ser obtidas por meio da realização de uma análise quanto às características naturais da região estudada, além do conhecimento das alterações de origem antrópica já realizadas.

Assim, a consciência de quais tipos de movimento de massa se pode esperar é de grande importância para o planejamento local, sendo que, dessa forma, pode-se definir quais técnicas e recursos correspondentes devem ser aplicados no local para a correta implantação de obras e ocupação do solo.

2.2 Movimentos de massa

De acordo com Tominaga, Santoro e Amaral (2012), os movimentos de massa constituem um processo natural de grande importância que operam na atividade das vertentes do solo, integrando a evolução geomorfológica em regiões declivosas. Segundo os autores, são os movimentos de massa, rocha e/ou vegetação em locais com alta declividade, sendo que meios como água ou gelo podem contribuir, agindo na redução da resistência dos materiais ou vertente presente no solo.

Tominaga (2007) cita que, além das características naturais que propiciam a ocorrência de desastres que envolvam movimento de massa, outro fator importante é o crescimento da população de forma indiscriminada em áreas inadequadas. Conforme a autora, a ocupação antrópica dessas áreas, sem a realização de técnicas de estabilização de encostas, acaba dissipando a ocorrência desses desastres com proporções muitas vezes catastróficas.

Existem várias classificações para os movimentos de massa, sendo mais utilizada internacionalmente a proposta de Varnes (1978), baseada no tipo de movimento de massa e em qual material é transportado. Em âmbito nacional, o Brasil possui algumas classificações de destaque: Freire (1965); Guidicini e Nieble (1984) e Augusto Filho (1992). No Quadro 2 encontram-se as principais características dos tipos de movimento de massa que ocorrem no país, segundo Augusto Filho (1992).

Quadro 2 – Principais características de cada tipo de movimento de massa recorrente no Brasil.

Movimento de massa	Principais características do processo
Rastejo	<ul style="list-style-type: none">- vários planos de deslocamento (internos);- velocidades muito baixas (cm/ano) e decrescentes com a profundidade;- movimentos constantes, sazonais ou intermediários;- solo, depósitos, rocha alterada/fraturada;- geometria indefinida;
Escorregamentos	<ul style="list-style-type: none">- poucos planos de deslocamento (externos);

	<ul style="list-style-type: none"> - velocidades médias (m/h) a altas (m/s); - pequenos a grandes volumes de material; - geometria e materiais variáveis; Planares — solos pouco espessos, solos e rochas com um plano de fraqueza; Circulares — solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas; Em cunha — solos e rochas com dois planos de fraqueza;
Quedas	<ul style="list-style-type: none"> - sem planos de deslocamento; - movimentos tipo queda livre ou em plano inclinado; - velocidades muito altas (vários m/s); - material rochoso - pequenos a médios volumes; - geometria variável: lascas, placas, blocos, etc; Rolamento de matacão e tombamento;
Corridas	<ul style="list-style-type: none"> - muitas superfícies de deslocamento (inteRNA e exteRNA à massa em movimentação); - movimento semelhante ao de um líquido viscoso; - desenvolvimento ao longo de drenagens; - velocidades médias a altas - mobilização de solo, rocha, detritos e águas - grandes volumes de material; - extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas.

Fonte: Adaptado de Augusto Filho (1992).

Diversos fatores podem desencadear a ocorrência dos movimentos de massa, como o rompimento em algum ponto determinado da encosta, condições de estabilidade e equilíbrio do terreno ou a posição e movimentação da base da encosta. De forma geral, para que ocorra a movimentação do solo, é necessária a ocorrência de uma causa primária, como chuva intensa, e uma causa secundária, como a sobrecarga do solo. Além disso, é importante ressaltar que atividades antrópicas realizadas de forma inadequada acabam auxiliando e agravando a ocorrência desse tipo de fenômeno (SANTOS, 2007).

Varnes (1978) identifica como causas primárias a ocorrência de terremotos, chuvas intensas, erosão do solo, desmatamento, deposição irregular de resíduos, entre outros. Como causas secundárias, o autor cita a retirada irregular do solo, a entrada de água, o crescimento de vegetação em fendas de rochas, bem como a diminuição da coesão entre os materiais presentes nas encostas. Além das causas primárias e secundárias, a ocorrência dos movimentos de massa depende também dos agentes condicionantes do local,

como os elementos físicos que tenham ligação com a movimentação e com o rompimento da encosta, podendo ser subdivididos em agentes predisponentes e efetivos (SANTOS, 2007).

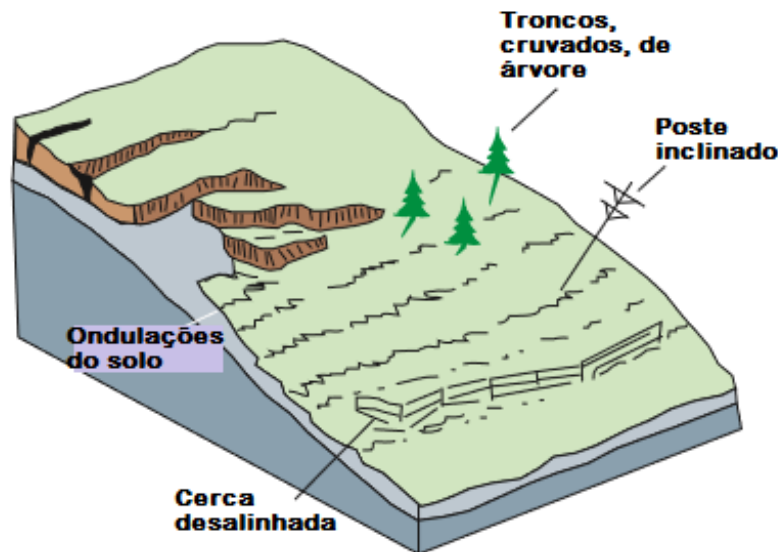
São agentes predisponentes o clima, o tipo de material presente no solo, o relevo, a vegetação local, o escoamento de águas superficiais e subterrâneas, além do uso e ocupação do solo. Os agentes efetivos, por sua vez, podem ser tanto preparatórios quanto imediatos. São preparatórios chuvas calmas e recorrentes e o acúmulo de água da chuva, preparando o solo para uma possível movimentação do mesmo. Por fim, como imediatos, tem-se chuvas intensas ou tremores de terra que, devido à sua ocorrência, resultam nos movimentos de massa (SANTOS, 2007).

Os movimentos de massa podem ser caracterizados em diferentes tipos, sendo chamados rastejos os movimentos muito lentos e contínuos de material com um fluxo descendente, envolvendo grandes volumes de solo - no entanto, sem grandes mudanças que diferenciem o material que se moveu daquele que permaneceu imóvel. Como principal causa de ocorrência dos rastejos encontra-se a ação da gravidade, em conjunto com as variações de temperatura e umidade do solo (TOMINAGA; SANTORO; AMARAL, 2012).

Existem basicamente três tipos de rastejos: os sazonais, em que o movimento do solo acontece em profundidade, pelas alterações na umidade e temperatura do solo; os contínuos, cujo esforço de cisalhamento é superior à resistência do material; e os progressivos, em que as inclinações do terreno podem anteceder outros tipos de movimento de massa. De modo geral, essa tende a ser a categoria de movimento de massa mais recorrente no mundo, em sua maioria precedendo movimentações com danos mais severos. Podem ter alcance regional, com grandes áreas atingidas, ou mesmo pontual, com áreas inferiores (HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008).

Na Figura 2, demonstra-se os danos causados pelos rastejos que, segundo os autores, tendem a ter velocidade de evolução em cerca de 1 m (metro) a cada década.

Figura 2 - Danos causados pela ocorrência de rastejos.

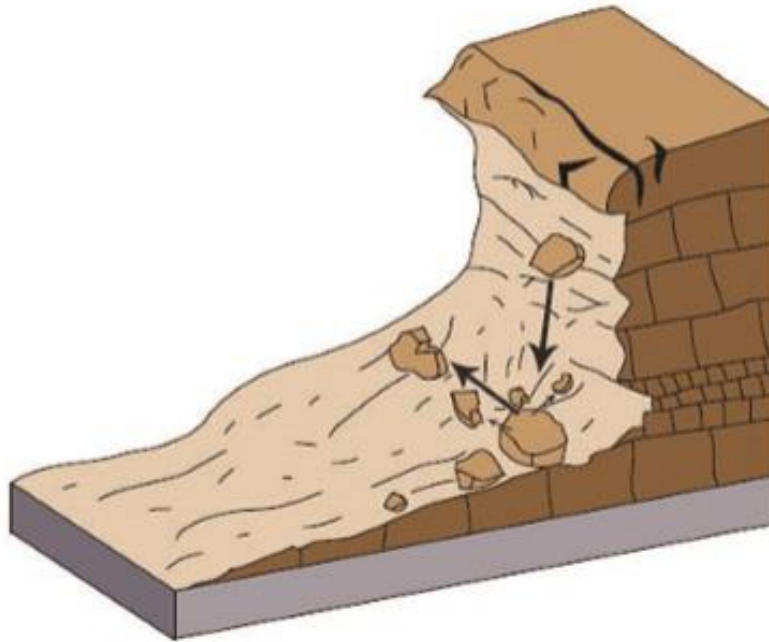


Fonte: Da autora, adaptado de Highland e Bobrowsky (2008).

A percepção da ocorrência de rastejo na paisagem é suave, constatando-se o fenômeno por meio de cercas, postes de luz ou árvores tortos ou inclinados. Highland e Bobrowsky (2008) ainda defendem que, como forma mais usual de mitigação para a ocorrência de rastejo, seria garantir a drenagem pluvial correta do solo.

As quedas de blocos, por sua vez, caracterizam-se como um movimento que não possui um plano definido de deslocamento, havendo quedas livres ou em planícies inclinadas (Figura 3), tendo velocidade superior ao rastejo. As quedas envolvem materiais rochosos, e originam-se, basicamente, de ações provenientes de intemperismo (GERSCOVICH, 2012).

Figura 3 – Ilustração de quedas livres e em plano inclinados.

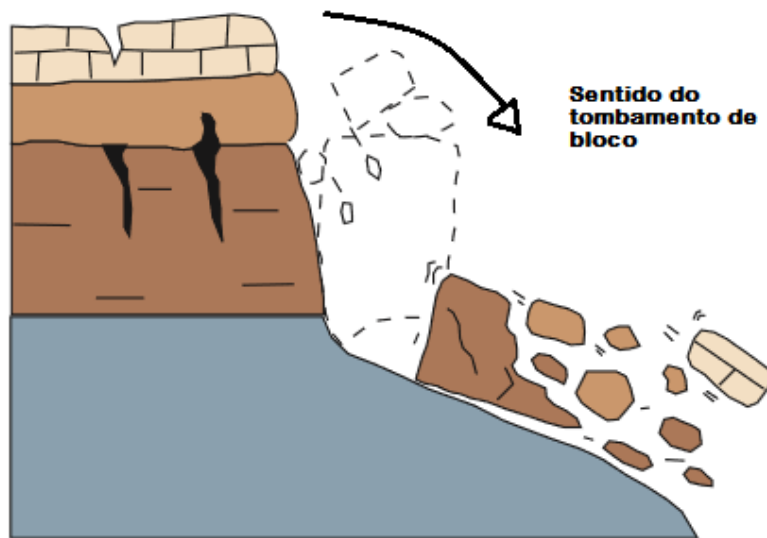


Fonte: Highland e Bobrowsky (2008).

Além dos blocos, as quedas ainda podem ocorrer com lascas ou maciços rochosos. Esse fenômeno pode estar associado a outras formas de movimentação de massa, como tombamento de blocos (TOMINAGA, SANTORO; AMARAL, 2012).

Os tombamentos (Figura 4) consistem na rotação frontal de um volume de massa, geralmente, rocha. Habitualmente, esse movimento é originado devido à força da gravidade em conjunto com o peso do material que será deslocado; por vezes, ele é influenciado pela presença de água entre as fendas das rochas.

Figura 4 – Movimento do tombamento de blocos.



Fonte: Da autora, adaptado de Highland e Brobowsky (2008).

Existem basicamente três tipos de tombamento: o flexural, o de blocos e o bloco-flexural, cada um com formas diferentes de abordagem. O primeiro ocorre com maior frequência, normalmente em taludes escavados e dá-se devido ao peso; o tombamento de blocos ocorre quando há mais de uma coluna rochosa e possui um espaçamento entre elas; o último é um fenômeno complexo que combina o fenômeno de escoamento do solo e tombamento (GOODMAN; BRAY, 1976).

Os autores citam que a superfície da ruptura que precede o tombamento tem início no pé do talude. Podendo a superfície ser paralela à face do talude, ou mesmo, obter uma curvatura, essas características devem-se à forma com que as cargas e rupturas são distribuídas no talude. De acordo com Highland e Brobrowsky (2008), normalmente não há mapas que exponham as áreas suscetíveis a esses movimentos; no entanto, ao se verificar uma possível ocorrência, ou mesmo após, pode-se utilizar, como forma de prevenção, a ancoragem dos taludes.

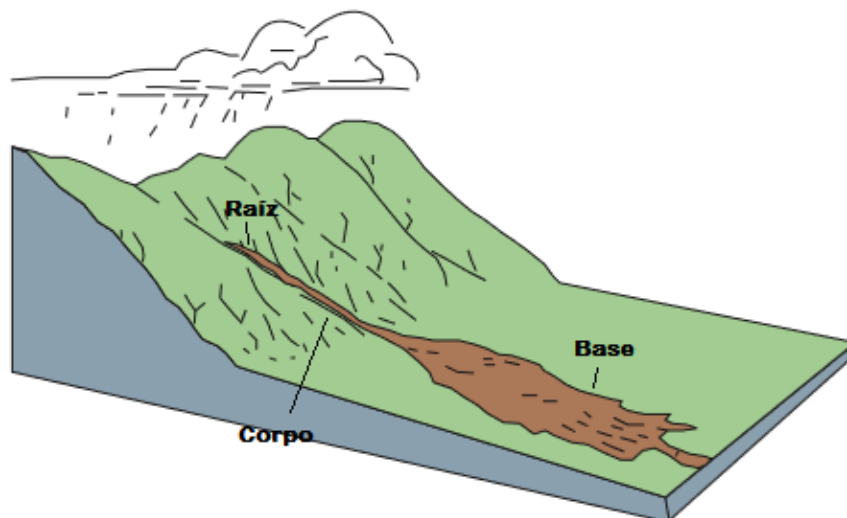
Os impactos gerados por quedas, de forma geral, podem resultar em óbitos, pois as distâncias percorridas podem ser grandes, além da probabilidade de alcance de residências que estejam em áreas próximas, podendo ocorrer

também, o bloqueio de estradas. Como forma de mitigação propõe-se a construção de cortinas ou muros de contenção, o planejamento da ocupação territorial e a não ocupação de áreas suscetíveis a esse tipo de fenômeno (HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008).

O terceiro tipo de movimento de massa abordado são as corridas de massa (Figura 5), as quais se caracterizam pela rápida movimentação do solo, com velocidade aproximada de 3 m/s, e ocorrem devido à total perda de resistência do material movido. O solo, por sua vez, passa a deslocar-se como um fluido, atingindo extensões significativas (GERSCOVICH, 2012). O autor expõe que o movimento ocorre em três etapas distintas: na região a montante concentra-se o material que será deslocado, denominado como raiz; a parte alongada, localizada no centro do movimento, é o corpo; e a parte final, onde há a deposição do material movido, denomina-se base e está localizada normalmente na região mais baixa do vale.

Segundo Highland e Bobrowsky (2008), esses movimentos são frequentemente causados devido ao grande fluxo de água superficial ou intensa precipitação, sendo que sua ocorrência prevalece em lugares de alta inclinação ou em encostas sem vegetação. Ao contrário dos rastejos, as corridas causam grandes danos e até mesmo óbitos devido à sua velocidade, incorporando diferentes materiais e podendo danificar grandes estruturas, bem como a qualidade de recursos hídricos em torno do ocorrido, devido à grande deposição de material.

Figura 5 - Ocorrência de corridas de detritos.



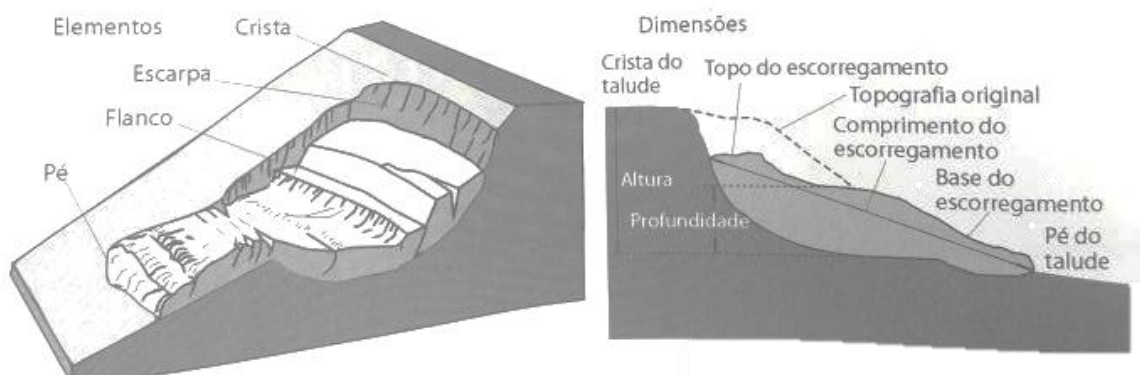
Fonte: Da autora, adaptado de Highland e Bobrowsky (2008).

Torna-se difícil evitar esse tipo de fenômeno, visto que áreas que já tem histórico de ocorrência têm uma tendência superior de reincidência. Como prevenção, o ideal é evitar construções em áreas suscetíveis. São exemplos ravinas ou regiões íngremes que tiveram supressão da vegetação (HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008).

Por fim, as últimas movimentações de massa a serem abordadas no estudo são os escorregamentos, também conhecidos como deslizamentos, queda de barreiras ou desbarrancamentos. São movimentos rápidos (semelhantes às corridas) de massa, solo ou rocha e procedem de uma cunha de solo, que se movimenta em relação ao resto do maciço e contém uma superfície de ruptura bem definida.

Assim, o material que se rompe pode deslizar além do pé da superfície de ruptura cobrindo a superfície original do terreno. Os deslizamentos caracterizam-se como os movimentos de massa mais recorrentes e são responsáveis por consequências de grande magnitude e importância (GERCOSVICH, 2012). Na Figura 6, estão expostos os elementos que caracterizam um escorregamento de massa.

Figura 6 – Caracterização de um escorregamento.



Fonte: Da autora, adaptado de Gerscovich (2012).

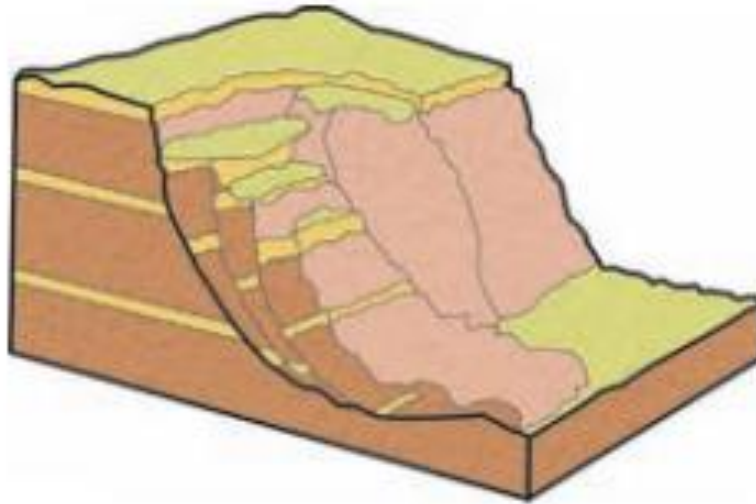
De forma geral, um deslizamento tende a ocorrer quando a resistência ao cisalhamento do material em relação à tensão de cisalhamento da superfície decresce de forma considerável, alcançando níveis extremamente baixos. Isto é, a força da gravidade torna-se maior do que a força que mantém o talude estável (GUIDICINI; NIEBLE, 1984). Segundo Lopes (2006), os deslizamentos têm duração curta, com limites laterais e profundidade do movimento bem definidos. Além disso, caracterizam-se como os movimentos mais marcantes, seja pela frequência de ocorrência, ou pelos severos danos causados a sociedade de forma geral.

Tominaga, Santoro e Amaral (2012) citam que, a velocidade do escorregamento depende da superfície do terreno, indo de zero a metros por segundo, sendo que os movimentos mais significativos ocorrem em locais com superfície de material homogêneo e com certa inclinação. Os deslizamentos podem ser divididos em três grupos se levado em consideração a forma com que se originam: circulares ou rotacionais; planares ou translacionais; e em cunha.

Deslizamentos circulares ou rotacionais (Figura 7) ocorrem quando a superfície de ruptura é curva, ao longo da qual o maciço do solo adere a um movimento rotacional. Normalmente os deslizamentos rotacionais se dão em

solos espessos e homogêneos, como os oriundos de modificações de rochas argilosas. Frequentemente inicia-se devido à realização de um corte na base desses materiais, como estradas, construções ou erosão fluvial (TOMINAGA, SANTORO; AMARAL, 2012).

Figura 7 - Esquema de escorregamento rotacional.



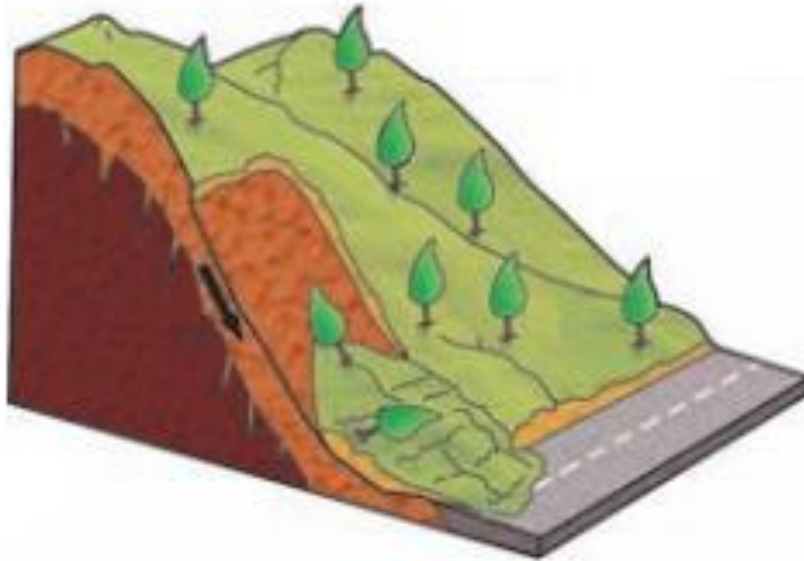
Fonte: Tominaga, Santoro e Amaral (2012).

A saturação de encostas devido à intensa precipitação, pode influenciar este tipo de movimento, além de que, sua ocorrência é normal em encostas com inclinação em torno de 20 a 40 graus. O arraste desse material é de difícil estabilização posterior à sua ocorrência, podendo auxiliar no desenvolvimento de inundações. Para a mitigação ou prevenção desses movimentos, indica-se a adequada drenagem das águas pluviais, bem como obras de engenharia que contenham as encostas instáveis (HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008).

Os deslizamentos planares ou translacionais, por sua vez (Figura 8), são os movimentos de massa mais frequentes dentre todos os tipos. A superfície do escorregamento é plana e sua ruptura ocorre onde houve algum tipo de modificação do solo, seja ela geológica, hidrológica ou mecânica.

Aliás, o plano de ruptura desse deslizamento é sua característica marcante, tendo seu rompimento em pontos que podem variar de 0,5 a 5 m de largura, atingindo uma área de deslizamento de centenas ou milhares de metros (FERNANDES; AMARAL, 1996).

Figura 8 – Ilustração de escorregamento planar.



Fonte: Tominaga, Santoro e Amara (2012).

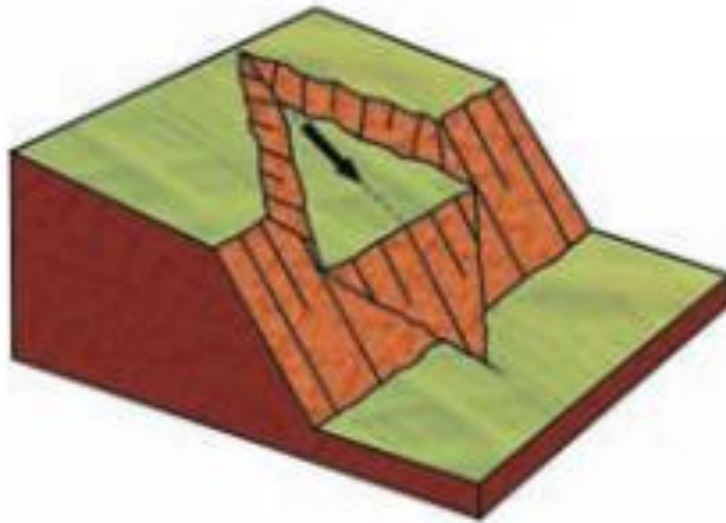
Nesse tipo de movimento pode-se ter o carregamento de rocha ou solo. No primeiro, a movimentação ocorre devido à fraqueza das estruturas envolvidas, em função da estratificação, por exemplo. Nos casos de movimentação de solo, os mecanismos envolvidos são a natureza da rocha, o clima e o relevo; nesse caso, tem-se um movimento curto, mas de velocidade elevada e alto poder de destruição. Os casos em que estão envolvidos tanto rocha, quanto solo, apresentam uma maior quantidade de rocha e envolvem massas de talús/colúvio (TOMINAGA; SANTORO; AMARAL, 2012).

Conforme Fernandes e Amaral (1996), as rupturas ocorrem de forma rápida e ocorrem comumente devido à presença de água superficial, como altas taxas de precipitação, aumentando a umidade do solo. Highland e Bobrowsky

(2008), indicam a correta drenagem do terreno, nivelamento e contensão de taludes como forma de prevenção.

Por fim, os deslizamentos em cunha (Figura 9) têm ocorrência inferior aos citados anteriormente. São movimentos com restrição de ocorrência às regiões com um relevo de estruturas geológicas, tendo associação a rochas alteradas ou não (TOMINAGA; SANTORO; AMARAL, 2012).

Figura 9 – Ilustração de escorregamento de cunha.



Fonte: Tominaga, Santoro e Amaral (2012).

De acordo com a figura acima, nota-se que, para a ocorrência desse tipo de deslizamento tem-se a necessidade de duas estruturas planas, favoráveis à instabilidade, tendo a conformação de um prisma ao longo da movimentação da massa. As principais ocorrências de deslizamentos em cunha ocorrem em cortes de taludes, ou então em encostas que passaram por modificações, seja natural ou antrópica (INFANTI JÚNIOR; FORNAARI FILHO, 1998).

2.3 Métodos e aplicações de análise de suscetibilidade a movimentos de massa

Existem diversas formas de identificação das áreas suscetíveis a movimentos de massa, em que, segundo Fell et al. (2008), o que difere qual tipo de mapeamento será feito é o objetivo principal do estudo, que abrange o tipo e o nível do zoneamento (Quadro 3).

Objetivo	Tipo de zoneamento			Nível de zoneamento				Escalas
	Inventário	Suscetibilidade	Perigo	Risco	Básico	Intermediário	Avançado	
Zoneamento Regional								
Informativo	X	X	-	-	X	-	-	1:25.000 até
Consultivo	X	X	(X)	-	X	(X)	-	1:250.000
Legal	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	
Zoneamento Local								
Informativo	X	X	X	(X)	X	(X)	-	1:5.000 até
Consultivo	(X)	X	X	X	X	X	X	1:25.000
Legal	-	(X)	X	(X)	-	X	X	
Zoneamento pontual								
Informativo	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	1:5.000 até
Consultivo	NUC	NUC	NUC	NUC	NUC	NUC	NUC	1:1.000
Legal	-	(X)	X	X	-	X	X	
Projeto	-	(X)	(X)	X	-	(X)	X	
Nota: X = aplicável; (X) pode ser aplicável; NR = não recomendado; NUC = não utilizado comumente.								

Quadro 3 – Tipos, níveis e escalas utilizáveis na elaboração de zoneamento de áreas suscetíveis a deslizamento.

Fonte: Fell et al. (2008).

É importante frisar que zoneamento de áreas de suscetibilidade diferem de zoneamento de áreas de perigo ou risco. A análise de áreas suscetíveis deve ser realizada mediante um zoneamento preciso e com etapas bem estabelecidas, além de uma divisão homogênea de porções de terra ou regiões, indicando o grau de suscetibilidade (baixo, médio, alto, entre outros). Como resultado da análise pode-se ter a elaboração de mapas ou cartas que identifiquem o quão suscetível é a região analisada (BITAR, 2014).

Além disso, de acordo com Julião et al. (2009), deve-se considerar a importância desse tipo de estudo para o planejamento e correto desenvolvimento das regiões analisadas, verificando-se a relevância do estudo, bem como a variabilidade espacial e disponibilidade de dados para sua realização. Sobreira e Souza (2012), por sua vez, ressaltam a importância da análise de suscetibilidade como base para a elaboração de mapas ou cartas, que visam expor a aptidão do uso da terra, assim com orientações para a sua utilização segura.

Segundo o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), é necessário seguir uma sequência de métodos para que haja a elaboração de cartas de suscetibilidade ou geotécnicas: a compilação e organização dos dados, com elaboração de mapas temáticos; a realização de análise e posterior classificação das áreas suscetíveis, com relação aos fenômenos selecionados; interpretação de imagens de feições, relacionadas aos processos em análise; elaboração de um mapa preliminar de áreas suscetíveis; visitas a campo que confirmem e validem as zonas suscetíveis obtidas no mapa preliminar; revisão do mapa e conclusão da carta e dados utilizados. Ao finalizar os passos descritos, tem-se como resultado a elaboração de uma carta de suscetibilidade resumida e um banco de dados organizado e específico para a área analisada (BITAR, 2014).

Para a compilação dos dados preliminares é de grande importância a utilização de ferramentas como geoprocessamento e sensoriamento remoto,

bem como os sistemas de informações geográficas (SIG). As informações cartográficas existentes devem ser ordenadas em camadas, em SIGs, sendo que cada uma terá ligação com dados básicos de entrada, como por exemplo imagens orbitais; base topográfica que contenham hidrografia, estradas primárias e secundárias; e mapa geológico do terreno (SOBREIRA; SOUZA, 2014).

Os autores mencionam que, com o processamento das informações básicas acima citadas, pode-se ter a obtenção de outras bases cartográficas, tais como representação de bacias de contribuição, mapa geomorfológico, descrição de áreas com histórico de inundações, mapas de cicatrizes oriundas de deslizamento de massa, entre outros.

Um ponto para ser levado em consideração na elaboração de mapas de suscetibilidade à movimentação de massa é o histórico da área analisada. Caso exista registro de ocorrência de movimentações na área de estudo, ou as características geológicas e geomorfológicas do local observado vão ao encontro dos atributos de uma outra região que já tenha um histórico de eventos deste tipo, a probabilidade de reincidência é superior (FELL et al., 2008).

No entanto, antes mesmo da confecção de mapas ou cartas de suscetibilidade, tem-se a necessidade de interpretação da ocorrência de movimentos de massa. Essa interpretação pode ser realizada por meio de técnicas de sensoriamento remoto, que requerem o conhecimento das diferentes formas associadas a esse fenômeno, bem como dos atributos das imagens que possuem essas formas. A interpretação de imagens de satélite pode ser induzida pelo contraste que existe nas feições e também nas suas áreas entorno. A variação do contraste das imagens se dá a partir do tempo desde que começou a erosão até o momento de ruptura da encosta; além disso, a gravidade do movimento também pode influenciar, havendo um maior ou menor arraste de massa da encosta (VANACÔR, 2006).

Com a utilização de imagens de satélite e a criação de um modelo digital de elevação (MDE), pode-se realizar a representação real da superfície do terreno analisado. Por intermédio de sistemas de informações geográficas e a disposição de uma malha de pontos sobre a imagem obtida é possível obter dados como área do terreno, imagens coloridas, mapas de declividade, entre outros (VANACÔR, 2006).

De forma geral, todos os processos físicos envolvidos em áreas urbanas ou rurais, como mudanças climáticas, fluxos de água, deslizamento de massa, entre outros, requerem a utilização de SIGs, que realizam a modelagem do fenômeno. A capacidade de representação desses processos por meio da utilização de SIGs, denomina-se simulação numérica dos processos. Além do mais, a sua integração com modelos heurísticos, estatísticos, físicos e matemáticos também vem ocorrendo gradualmente (LOPES, 2006).

Bueno (2009) expõe que os modelos heurísticos caracterizam-se como algoritmos exploratórios, que visam à resolução do problema sem o auxílio computacional de um conhecimento em particular. A imprecisão dos modelos heurísticos não ocorre por serem modelos com eficiência inferior, mas sim pela singularidade do modelo, que corresponde à forma humana de resolver os problemas. Como exemplo de modelo heurístico tem-se o cruzamento de mapas, que consiste basicamente na sobreposição de temas que permitem estudar diversos fatores ambientais e monitorar a utilização do uso do solo (KLEINPAUL, 2005).

Vários estudos são realizados utilizando essa técnica, como o de Augusto Filho (2005), que utilizou o modelo de cruzamento em um estudo na região da Serra do Mar, no Estado de São Paulo. Na ocasião, foi realizado o mapeamento da região com o principal objetivo de identificar quais tipos de movimento de massa decorriam e o grau de suscetibilidade que a região possuía. Os movimentos de massa identificados foram: movimentos rasos, grandes movimentos de detritos e fluxo de detritos. Com relação à suscetibilidade da

área, houve a classificação em nível baixo, médio, alto, muito alto e movimento de tálus.

Outro modelo bastante utilizado na identificação de deslizamento de solo é denominado de “árvore de decisão”, que se baseia na técnica de aprendizagem de máquinas e inteligência artificial. Caracterizado como um modelo hierárquico, seu objetivo é encontrar um conjunto de regras de decisão com base em dados de entrada, fornecendo os resultados em seus dados de saída. A vantagem principal desse modelo é a possibilidade de modelar relações complexas entre as variáveis de entrada, além de fornecer a real importância para cada variável. Todavia, a árvore de decisão também possui desvantagens, sendo a principal delas a possibilidade de geração de dados de saída insustentáveis (BUI et al., 2012).

Yeon, Han e Tyu (2010) usaram o método para áreas suscetíveis a movimentos de massa em uma região localizada entre as cidades de Inje-eup e Buk-myeon, na província de Gangwon, Coréia do Sul. Em 2006, houve um evento extremo de precipitação na região, resultando em mais de 600 cicatrizes originadas por movimentação de massa. Os autores chegaram a uma precisão de aproximadamente 86% de suscetibilidade para a validação cruzada do método e, quando analisada a sua precisão, utilizando todos os dados conhecidos, o resultado foi superior a 89%, concluindo a eficácia do mesmo.

Como exemplo de modelo estatístico, tem-se o *Support Vector Machines* que, assim como o modelo anterior, também consiste em uma técnica de aprendizado de máquina. Esse modelo foi desenvolvido por Vapnik, em 1999, e engloba um sistema treinado com um algoritmo de otimização matemática. Suas características mais marcantes são a sólida fundamentação teórica e os altos desempenhos alcançados em aplicações práticas. Basicamente, são inseridas variáveis de entrada, controladas e ajustadas pela pessoa que está realizando o teste, e o método em si busca uma minimização de erros ao longo do processo (SANTOS, 2002).

Xu et al. (2001) utilizaram esse modelo para analisar a suscetibilidade de áreas atingidas por um terremoto na China, em maio de 2008. Na época, foram identificadas mais de 3000 cicatrizes de deslizamento de terra na região afetada. Características naturais do terreno, como declividade, litologia, hidrografia, entre outras, foram utilizadas para controle dos testes, gerando três grandes grupos de entrada do modelo. Como resultado, obteve-se 12 mapas de áreas suscetíveis a movimentos de massa e, após a comprovação a campo, verificou-se que o índice de precisão do modelo foi superior 79%, certificando a sua eficiência.

No Brasil, um modelo bastante utilizado para a determinação de movimentos de massa é o *Shalstab* (*Shallow Landslide Stability Analysis* - análise de estabilidade de movimentos rasos), e caracteriza-se como um modelo matemático. O modelo consiste na determinação de áreas suscetíveis a movimentos de massa, a partir da exploração de dados de um modelo determinístico, e origina-se da fusão de outros dois modelos, um hidrológico e outro de estabilidade de taludes infinitos (DIETRICH; MONTGOMERY, 1998).

Fernandes et al. (2001) realizaram um estudo utilizando esse método, na bacia hidrográfica do Rio Quitite e Papagaio, no Rio de Janeiro. O objetivo principal do estudo foi encontrar maneiras de prevenir os movimentos de massa na região. Para a realização da simulação, houve uma análise entre as regiões tidas como instáveis pelo modelo, e as áreas onde de fato já haviam ocorrido movimentos de massa. Os resultados alcançados foram satisfatórios, visto que havia um histórico de escorregamento de terra nas áreas que o modelo identificou como instáveis.

Dentre outros modelos que podem ser utilizados tem-se as redes neurais artificiais (RNA), escolhido para a realização do presente estudo. Esse modelo tem sido amplamente utilizado em estudos internacionais; em contrapartida, no Brasil a sua utilização ainda é reduzida, em comparação a outras técnicas.

Consiste em um modelo matemático que procura reproduzir o funcionamento de um cérebro humano (HAYKIN, 2001).

A realização das primeiras simulações com neurônios biológicos foi realizada em 1943, por McCulloch e Pitts, reproduzindo o comportamento de um neurônio natural através da utilização de um modelo lógico-matemático, denominado neurônio artificial, que permitia a entrada de uma ou mais variáveis e resultava em apenas um sinal de saída. A primeira aplicação prática do modelo, no entanto, ocorreu apenas em 1958, feita por Rosenblatt, com a criação de uma rede composta por uma camada de neurônios artificiais, permitindo um número de saídas equivalente à quantidade de neurônios empregada. Originou-se então a primeira rede neural capaz de identificar padrões por meio de um algoritmo próprio de treinamento (OLIVEIRA, 2015).

A partir dos anos 1980, houve um interesse maior no desenvolvimento das redes neurais artificiais, tendo sido proposto por Rumelhart, Hinton e Williams (1986) um modelo de múltiplas camadas, com a aplicação do método retropropagativo para treinamento de redes, bem como a utilização de outras ferramentas computacionais. Desde então, as redes neurais artificiais têm sido cada vez mais utilizadas, produzindo resultados satisfatórios em diversas áreas.

Oliveira (2015) expõe que o processamento das RNA ocorre por meio dos neurônios artificiais, os quais possuem capacidade de aproximar as relações entre variáveis de entrada e saída. A solução de um neurônio artificial individual ocorre pela função de ativação atuante sobre a soma ponderada das entradas desse neurônio. Os coeficientes de ponderação de cada entrada são denominados pesos sinápticos, e são adicionados para que toda saída assuma valores diferentes de zero, mesmo que a entrada seja nula.

Todas as transformações de entrada originam um neurônio, resultante das funções de ativação. Segundo Kasabov (1998), existem três principais funções de ativação, que são: a função limiar, que classifica as saídas como 1 ou 0; a função linear, utilizando transformações lineares; e a função sigmoide,

que se caracteriza como a principal função de ativação das RNA. A função sigmoide possui um gráfico com formato de “S” e, pelo fato de ser uma função não linear, possui valores nos intervalos, sendo 0 e 1 para a função sigmoide unipolar e -1 e 1 para a bipolar.

Basicamente, o desenvolvimento das RNA consiste na correta definição e organização dos dados, ou seja, na quantidade e na forma em que serão dispostos os neurônios artificiais e suas respectivas ativações, bem como o treinamento e a verificação da generalização, comparando os valores estimados pela rede treinada com os encontrados através da utilização dos dados não utilizados no treinamento da rede (HAYIKIN, 2001).

Kanungo et al. (2006) realizaram um estudo na região do Himalaia, comparando redes neurais artificiais com outros métodos. As camadas temáticas relevantes pertencentes às causas foram geradas usando dados de sensoriamento remoto, pesquisas de campo e ferramentas do SIG. No sistema de ponderação convencional, os pesos e as classificações dos fatores causais e suas categorias são atribuídos com base na experiência e conhecimento de especialistas sobre o assunto e sobre a área de estudo.

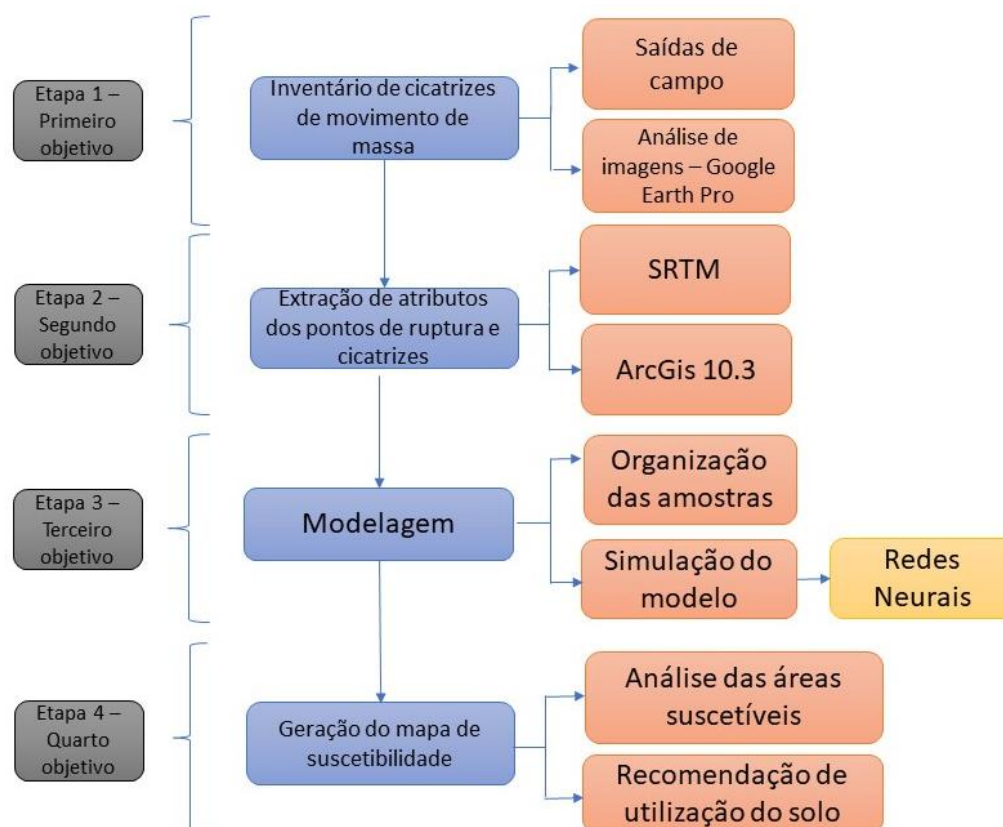
Posteriormente, um novo procedimento baseado em RNA foi implementado, atribuindo peso à cada camada de neurônio. Na geração e análise dos mapas, as redes neurais artificiais apresentaram grande eficácia na identificação das áreas. Com a realização de visitas a campo, verificou-se que cerca de 30% das áreas já sofreram movimentos de massa, garantindo a efetividade do modelo.

3 METODOLOGIA

O presente estudo consistiu na identificação de áreas suscetíveis a movimento de massa na bacia hidrográfica do rio Fão, dividido em quatro etapas: i) a organização de um inventário de cicatrizes de movimentos de massa; ii) a extração dos atributos do terreno da bacia, como variáveis de entrada para a modelagem; iii) a modelagem das áreas suscetíveis por meio de um modelo baseado em redes neurais artificiais; iv) a geração de um mapa de suscetibilidade apresentando diretrizes para a utilização do solo da bacia em função das áreas suscetíveis.

Na Figura 10 estão expostas as etapas do estudo, com posterior detalhamento.

Figura 10 – Fluxograma das etapas do estudo.



Fonte: Da autora (2017).

Segue à descrição dos principais materiais, dados e softwares a serem utilizados para a realização deste projeto.

3.1 Materiais, dados e softwares

Para a elaboração do presente estudo, foram utilizados os seguintes dados, softwares e equipamentos, listados abaixo:

- ArcGis 10.3;

- Google Earth Pro;
- Matlab R2015a;
- Microsoft Excel 2016.
- dados do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), disponibilizados no Banco de Dados USGS da Nasa, com resolução espacial de 30 metros;

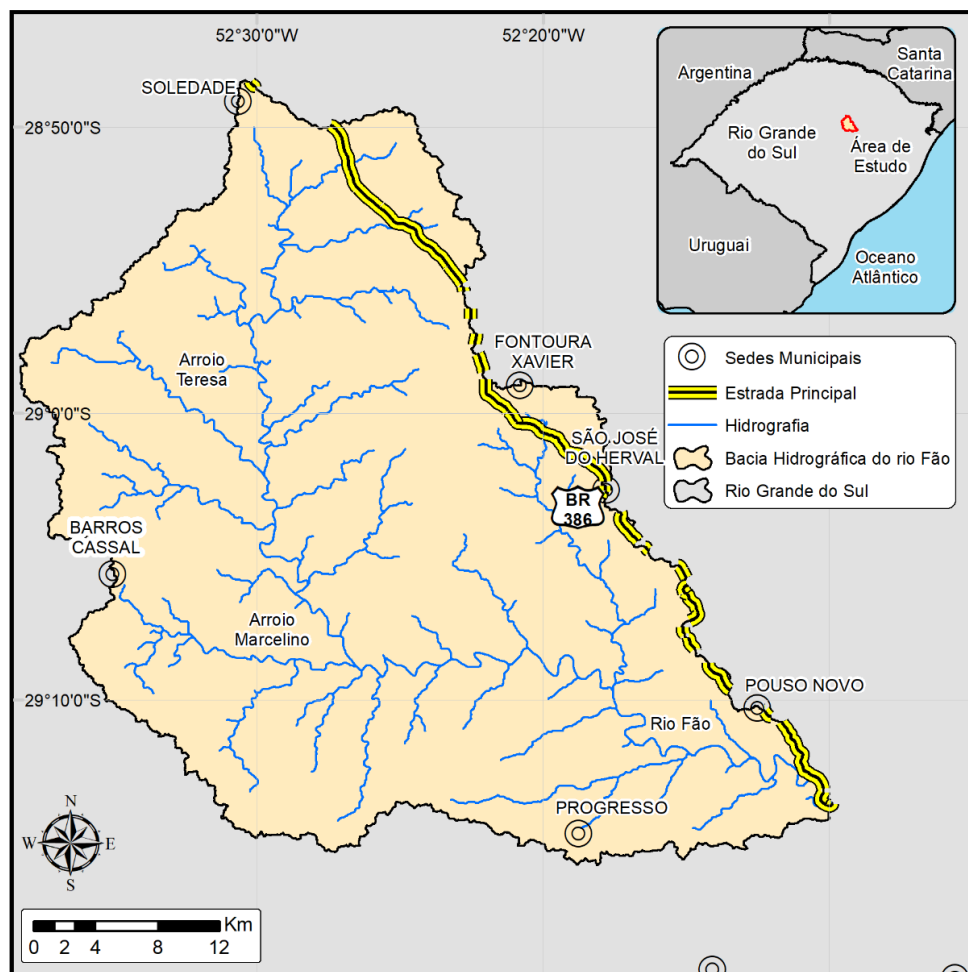
3.2 Área de estudo

A área de estudo do presente trabalho compreende a bacia hidrográfica do Rio Fão, integrante da bacia hidrográfica do Rio Forqueta que, por sua vez, faz parte da bacia hidrográfica Taquari-Antas (Figura 11). A área total da bacia é de aproximadamente 1.290 Km², abrangendo os municípios de Barros Cassal, Boqueirão do Leão, Fontoura Xavier, Marques de Souza, Pouso Novo, Progresso, São José do Herval e Soledade. Ocupa cerca de 4,90% do território total da bacia Taquari-Antas e 45% da bacia hidrográfica do Rio Forqueta. Os principais afluentes do Rio Fão são os Arroios Marcelino e Teresa.

Segundo a Classificação Internacional de Köppen, o clima da região enquadra-se na zona fundamental temperada úmida (Cf), subdividida em duas classificações: Cfa (subtropical) na parte baixa da bacia, e Cfb (temperado), sobre a região ao norte da bacia. A bacia hidrográfica do Rio Fão tem a dominância da Floresta Ombrófila Mista, dividida em três níveis: submontana, montana e altomontana (REMPEL, 2000).

Com base nos dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), estima-se que a população total da bacia hidrográfica do Rio Fão é de aproximadamente 19.830 habitantes, tendo uma densidade populacional de cerca de 16 hab./km². O cultivo de soja na região é bastante presente, no entanto não há ocorrência do plantio em áreas consideradas inadequadas, como encostas íngremes.

Figura 11 – Mapa de localização da bacia hidrográfica do Rio Fão.



Fonte: Da autora (2017).

Segundo Rempel (2000), a bacia hidrográfica do Rio Forqueta, de forma geral, conta com duas fisionomias: uma parte dela está localizada no Planalto Meridional e outra na Depressão Central. As áreas abrangentes pelo Planalto Meridional, na Serra Geral, caracterizam-se pela presença de encostas muito escarpadas, sendo que a bacia hidrográfica do Rio Fão está localizada nessa região e, devido às características locais, os movimentos de massa acabam sendo influenciados.

Com frequência ocorrem eventos extremos hidrometeorológicos na região, sendo o mais marcante deles, até então, o ocorrido nos dias 03 e 04 de janeiro de 2010. O evento extremo foi influenciado por jatos de baixos níveis e pela formação de um corredor de umidade oriundo da região noroeste, em

associação teve-se a presença de um centro de baixa pressão na região do Chaco. A precipitação teve seu pico entre as 11h e as 16h do dia 04/01/2018, sendo que o seu acúmulo superou os 250 mm em menos de 24 horas. No Município de Soledade, o somatório foi de 247 mm e em Gramado Xavier a marca superou os 320 mm (OLIVEIRA; FLORES; BRESOLIN, 2017). Além da forte precipitação, os autores ainda citam a ocorrência de movimentos de massa sequenciais nas encostas do rio Fão e arroio Tereza.

3.3 Métodos

O processo metodológico foi dividido em quatro etapas, onde cada uma delas tem relação com um dos objetivos específicos definidos.

3.3.1 Inventário de cicatrizes de movimento de massa

O inventário de cicatrizes de movimento de massa consistiu, de maneira geral, na compilação dos dados básicos que foram utilizados durante todo o estudo. Esse processo teve seu início ainda no ano de 2016, sendo que em um primeiro momento realizou-se o levantamento de possíveis cicatrizes que pudesse haver na área de estudo, resultantes do evento extremo ocorrido em janeiro de 2010. Essa pesquisa utilizou imagens de alta resolução, disponíveis no Google Earth Pro, anteriores ao evento (ano de 2008) e posteriores (ano de 2012).

Com a identificação das cicatrizes nas imagens analisadas, bem como, sedimentos ao longo do leito do rio, foram feitas visitas a campo para realizar uma validação, isto é, se o que estava sendo analisado nas imagens condizia com a realidade da área do estudo. Em conversas com moradores de áreas do entorno do Rio Fão e Arroio Tereza, confirmou-se uma ocorrência simultânea entre os movimentos e a precipitação extrema de 2010 conforme já exposto por Oliveira, Flores e Bresolin Júnior (2017).

As cicatrizes identificadas nas imagens de satélite foram vetorizadas manualmente, e exportadas como arquivos KML. Posterior a isso, com auxílio do ArcGis transformou-se os polígonos das cicatrizes em pontos, sendo que o preenchimento de cada polígono ocorreu por meio de uma malha de pontos com a mesma resolução do modelo digital de elevação (MDE), ou seja, um ponto para cada pixel do MDE. Caracterizou-se estas áreas como áreas de ocorrência de movimento de massa.

Para o restante da área de estudo, e em locais de não ocorrência de movimento de massa, inseriu-se pontos aleatórios, de modo que a mesma quantidade de pontos inseridos fora das áreas de ocorrência fosse igual a de pontos inseridos nas áreas com ocorrência de movimento de massa. Dessa forma, o conjunto amostral caracterizou-se como 50% de amostras de ocorrência de movimento de massa e 50% de amostras de não ocorrência.

No editor de planilhas Excel, cada linha caracteriza uma amostra e cada coluna representa um dos atributos extraídos do terreno. Optou-se por um processo de classificação binária, por facilitar a classificação. As amostras que caracterizam a ocorrência de movimento de massa foram classificadas como 1, e as de não ocorrência de movimentos como 0.

3.3.2 Extração de atributos do terreno

Para a representação da bacia hidrográfica do rio Fão foram utilizados os dados altimétricos do *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM), que consiste em um modelo digital de elevação (MDE), com resolução espacial de 30 metros, disponibilizado gratuitamente no banco de dados geomorfométricos do *United States Geological Survey* (USGS) (NASA, 2018).

Utilizou-se dados obtidos do estudo de Oliveira, Flores e Bresolin Júnior (2017) onde, com base na altitude retirada do MDE selecionado, extraiu-se os demais atributos do terreno, totalizando 11, que são: i) elevação; ii) declividades;

iii) curvatura horizontal do terreno; iv) curvatura vertical do terreno; v) orientação do terreno; vi) distância horizontal da hidrografia; vii) distância vertical da hidrografia; viii) distância dos topos de morros e linhas de cumeada; ix) fator topográfico (LS); x) índice de profundidade do vale (VD); e xi) índice topográfico de umidade (TWI). Assim, a amostragem das cicatrizes, em conjunto com a relação dos atributos do terreno, resulta em uma análise morfométrica, que permite identificar o peso de cada variável em relação à ocorrência de movimento de massa. Para tanto, utilizou-se dados obtidos do estudo de Oliveira, Flores e Bresolin Júnior (2017).

Segundo Sirtoli et al. (2008), a elevação consiste na apresentação da distância das classes de altitudes ou dos patamares hipsométricos paralelos. A declividade, por sua vez, é exposta por Burrough (1986) como um plano de superfície, expresso pela mudança da elevação em determinada distância e em determinada resolução. A orientação do terreno é uma característica pouco utilizada; no entanto, possui grande importância, pois é ela que indica a direção das vertentes do terreno e caracteriza-se como uma condição primária, com ligação às demais características do terreno, como por exemplo o teor de água do solo (CHAGAS, 2006).

As curvaturas, tanto a vertical quanto a horizontal, são importantes atributos do terreno na diferenciação de unidades geomorfológicas. A primeira tem ligação com a modalidade de vertentes verticais, podendo assumir três formas: côncava, convexa ou retilínea. A segunda, por sua vez, também tem ligação com vertentes, mas no sentido horizontal do terreno, podendo ser convergente, divergente ou planar (SIRTOLI et al., 2008).

Moore et al. (1993) definiram o índice de umidade topográfica (TWI) como o responsável pela caracterização da distribuição espacial de água, expondo regiões que tenham saturação superficial, bem como aquelas que tendem a acumular água. Os autores ainda expõem que o TWI e a declividade são os atributos de relevo que mais se correlacionaram com os demais.

O fator LS, por sua vez, caracteriza-se como uma condição de uniformização do terreno, uma vez que, se ele não possuir a mesma inclinação ao longo de toda a sua extensão, ela será dividida em vários segmentos, adotando assim uma certa uniformidade em sua extensão (DESMET; GOVERS, 1996). Por fim, a profundidade do vale é a sua altura vertical, sendo que a linha de distância da hidrografia consiste na distância horizontal entre o leito do rio e as linhas de cumeada; por sua vez, a distância de topo de morro e cumeada é a distância entre os topos das encostas (LEITE; ROSA, 2012).

3.3.3 Modelagem de áreas suscetíveis a movimento de massa

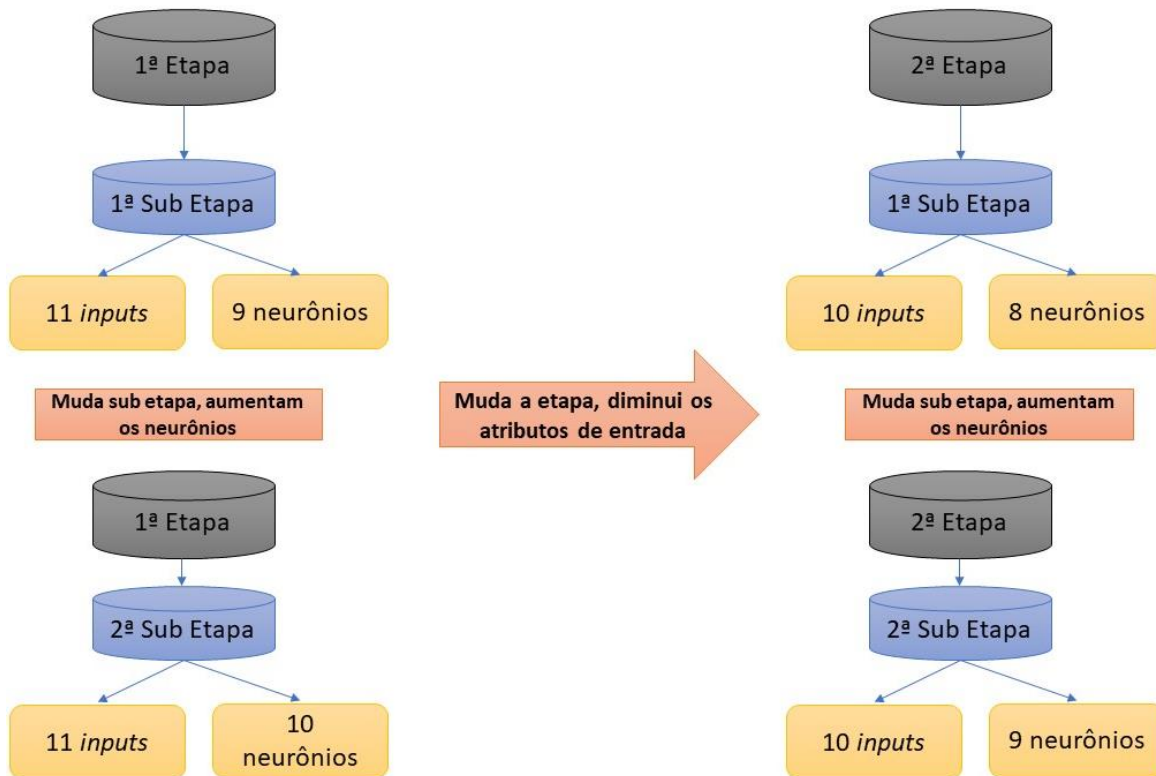
Organizou-se os pontos de ocorrência e não ocorrência de movimento de massa de modo a correlacionar cada um deles com seus respectivos valores das variáveis do terreno, originando assim um conjunto amostral. A partir do conjunto amostral organizado, deu-se início à simulação do modelo com o uso de redes neurais artificiais, utilizando o *software* Matlab. Diversas configurações foram testadas nas RNA, cujo funcionamento assemelha-se com os neurônios humanos, fortalecendo as conexões (relação entre os atributos do terreno e o mapa de cicatrizes), que resultam em um erro de classificação menor e enfraquecendo as conexões sinápticas, consistindo em maior inconsistência de classificação. Assim, foi utilizado um algoritmo proposto por Oliveira, Pedrolo e Castro (2015) para excluir as variáveis de entrada (atributos do terreno) que menos influenciam nos resultados do modelo.

Em um primeiro momento inseriu-se no modelo as entradas (*inputs*), sendo que na primeira etapa são 11 *inputs*, que representam cada um dos atributos extraídos do terreno. Em cada etapa foi realizada a exclusão da variável menos importante, para verificar se o desempenho da RNA e sua parcimônia aumentam com a simplificação da rede. Foram nove etapas no total, sendo que na última foram utilizados somente 3 *inputs*. É importante ressaltar que em todas as etapas os *inputs* foram os mesmos, variando apenas o corte do atributo menos importante.

Cada etapa possuiu dez subetapas, sendo que na sua camada intermediária ocorreu um aumento dos neurônios, ampliando a complexidade da rede, o que pode melhorar o desempenho, no entanto isso não necessariamente acontece e, devido a isso, testou-se várias configurações.

O esquema exposto na Figura 12 exemplifica a sucessão de etapas que ocorre na RNA.

Figura 11 – Evolução das redes neurais artificiais por etapa.



Fonte: Da Autora (2017).

O processo de redes neurais artificiais ainda contou com a mudança de muitos outros fatores, como as iterações, que são o número de vezes em que a rede será inicializada ao longo das etapas e subetapas; nesse caso, optou-se por 30 iterações. Em função de a rede neural iniciar de modo aleatório, nem sempre optará pelo melhor caminho inicialmente, recomeçando-o de forma automática a fim de encontrar a melhor opção. Após as 30 iterações aumenta a confiabilidade de que a RNA encontrou o melhor resultado possível com aquela combinação de *inputs* e neurônios na camada intermediária.

Dentro de cada iteração estão os ciclos de aprendizagem com quantia variável, conforme necessário. Em cada novo ciclo o peso das entradas é alterado automaticamente, devido à utilização do algoritmo retropropagativo, proposto por Rumelhart, Hinton e Williams (1986), reduzindo os erros de classificação do modelo, a partir do seu treinamento. Para este caso optou-se pela utilização de 10.000 ciclos; logo, o modelo possuiu 10.000 chances de

acertar o melhor caminho em cada iteração. Normalmente a convergência, que será o encontro do caminho ótimo, ocorre antes do total de ciclos delimitado.

Para que o processo de exclusão de atributos ocorra, gera-se uma espécie de perturbação entre as variáveis de entrada. Oliveira, Pedrollo e Castro (2015) citam que é atribuída uma porcentagem a cada um deles, isto é, o valor que determinado atributo influencia em porcentagem no resultado final, sendo que cada *input* de forma individual é perturbado. Os autores ainda exemplificam o modelo de entrada e saída de uma RNA em uma equação (Equação 1).

Equação 1 – Cálculo de entrada e saída de uma RNA.

$$ANN\left(\frac{xt-Pi}{Si}\right)=fo\left(\sum_h wofh\left(\sum_i wh\left(\frac{xt-Pi}{Si}\right)+bh\right)+bo\right)eo \quad (1)$$

em que w_h , b_h , f_h , w_o , b_o e f_o são os pesos sinápticos (w), o viés (b) e as funções de ativação (f), respectivamente, das camadas ocultas (h) e saída (o), enquanto que e_o é o erro esperado na camada de saída.

O primeiro passo é calcular a saída de cada unidade da RNA, começando a partir da camada de entrada e propagando através da camada oculta para a camada de saída. Os pesos sinápticos de cada neurônio são atualizados em cada iteração, usando o que é denominado regra delta, originalmente formulada por Widrow e Hoff (1960) para RNA de apenas uma camada.

Por fim, teve-se a validação dos modelos e gerações dos mapas, que levou em consideração, entre outros tópicos, o número de neurônios que alterou na camada oculta, de acordo com o número de *inputs*. O critério para definição do modelo utilizado se deu, em um dos casos, com base em sua parcimônia, usando o Critério de Informação Akaike, do inglês *Akaike Information Criterion* (AIC), (Equação 2), que relaciona o desempenho do modelo com o número de seus parâmetros (AKAIKE, 1974).

Equação 2 – Critério de Informação de Akaike.

$$AIC = nd \times \ln ep + 2 \times np$$

(2)

em que *nd* é o número de dados, *ep* é o erro padrão e *np* é o número de parâmetros dos modelos.

O índice de Akaike baseia-se na identificação de um modelo simplificado que apresente bons resultados, ou seja, o modelo mais parcimonioso. Uma segunda possibilidade é a escolha do modelo com base em sua acurácia, ou seja, o quão próximo o modelo testado está da realidade (MIKHAIL E ACKERMANN, 1976). Posterior a isso, novamente realiza-se a exportação para o ArcGis para que então se tenha a geração do mapa de áreas suscetíveis a movimentos de massa.

4.3.4 Elaboração do mapa de suscetibilidade a movimentos de massa

O presente trabalho buscou utilizar escalas de 1:50.000 ou maiores, o que permitiu identificar movimentos de massa, inundações/enchentes, corridas, erosões, assoreamento, processos costeiros ou sismos induzidos. Para a avaliação final das áreas foi considerada a formação geológica, geomorfológica e características morfométricas locais, bem como o número de ocorrências de movimentos já verificados na área ou no seu entorno.

Após a escolha da configuração que melhor se adequou para a geração do mapa, importou-se os dados obtidos a partir das RNA no *software* ArcGis. Relacionou-se os valores contidos na tabela importada, com a malha de pontos que representa os pixels do SRTM. Após a união dos dois arquivos os pontos foram novamente convertidos em *raster* de modo que houvesse a divisão das classes de suscetibilidade.

A nomenclatura ou classificação de cada pequena região analisada deu origem às diretrizes para o uso do solo, assim como para a sua ocupação, indicando quais as possíveis áreas habitáveis ou não. Nesse caso, as divisões

das áreas ocorreram em quatro zonas: baixa, média, alta ou muito alta suscetibilidade, tendo como base o Guia de Cartas Geotécnicas (IPT, 2015).

Ainda com base no guia citado anteriormente, a primeira classificação abrange áreas que não possuem restrições ao uso ou ocupação do solo, sendo seu grau de suscetibilidade de ocorrência de movimentos muito baixo, não oferecendo grandes riscos às futuras instalações de residências, empresas, entre outros, ou mesmo a utilização do terreno para plantações. As áreas de média suscetibilidade são regiões que possuem algum tipo de restrição geotécnica, tal como declividade ligeiramente elevada ou encostas pouco íngremes e com ausência de vegetação. Nesse caso, serão apresentados critérios técnicos de utilização, bem como diretrizes para as construções já consolidadas. Por fim, as áreas de alta ou muito alta suscetibilidade são todas aquelas que possuem altas ou altíssimas restrições para a ocupação, seja para moradias ou mesmo cultivo do solo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Inventário de cicatrizes de movimento de massa

Após análise das imagens do Google Earth, pré e pós evento extremo de janeiro de 2010, foram identificadas 121 cicatrizes nas encostas da bacia hidrográfica do Rio Fão, sendo que a grande maioria delas está localizada às margens do Arroio Teresa. Além disso, é possível identificar acúmulo de detritos e sedimentos ao longo do leito do rio (Figura 13).

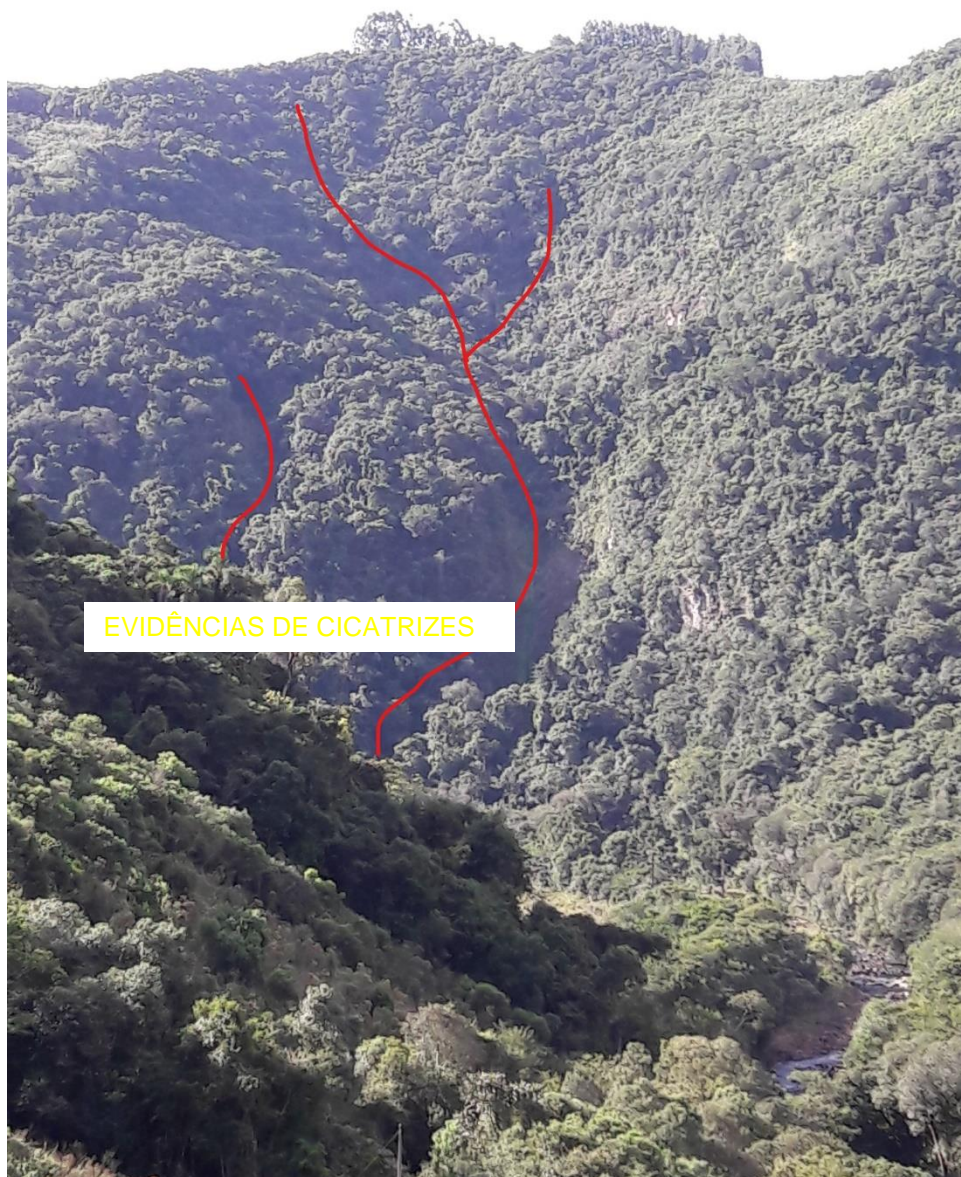
Foram mapeados um total de 27,3 hectares de cicatrizes, com comprimento médio de 250 m, sendo o comprimento máximo de aproximadamente 1.000 m e o mínimo de 30 m, a largura média das cicatrizes mapeadas é de 20 m. Visitas a campo possibilitaram a verificação das cicatrizes (Figura 14 e 15), e apesar de ser claramente visível onde houve ocorrência dos movimentos de massa, a vegetação local encontra-se em processo avançado de recuperação, além disso, de acordo com o solo local é possível caracterizar os eventos como rasos, com profundidade média menor que 1 m.

Figura 12 – Identificação de cicatrizes decorrentes de movimento de massa e acúmulo de detritos no leito do rio.



Fonte: Google Earth Pro (2018)

Figura 14 – Cicatrizes decorrentes de movimento de massa
Verificadas em campo.



Legenda - Data: 17/04/2018; Coordenadas: 29°00'13"S e 52°31'29"O.
Fonte: Da autora (2018).

Figura 15 – Cicatrizes decorrentes de movimento de massa verificadas em campo.



Legenda – Data: 17/04/2018; Coordenadas: 29°00'40"S e 52°31'13"O.

Fonte: Da autora (2018).

Em conversas com os moradores locais, obteve-se o relato de seguidas movimentações de solo no evento extremo de 2010, sendo o intervalo de tempo

entre as ocorrências muito pequeno, quase que simultâneas, o que pode justificar a presença da grande quantidade de sedimentos no leito do rio. Além da sequência de movimentos de massa, os moradores ainda relataram uma onda de lama que ocasionou a enxurrada.

Uma hipótese já levantada por Oliveira, Flores e Bresolin Júnior (2017) é a possibilidade de formação de barragens naturais no interior do curso hídrico, por meio da água escoada, em conjunto com detritos, solo e material vegetal provenientes das encostas. Outro fator importante que os autores citam é a conformação das áreas em torno ao Arroio Teresa, que acabam por propiciar a formação de barragens naturais, devido à presença de meandros com ângulos fechados, definidos pelo forte controle estrutural nas linhas de drenagem da área de estudo, típico da unidade geomorfológica da Serra Geral.

Existem diversos relatos sobre a ocorrência de barragens naturais decorrentes do acúmulo de detritos em fundos de vale. A formação desse tipo de fenômeno pode variar tanto com relação ao seu tamanho quanto à sua estabilidade, podendo ser mantida por centenas de anos sem causar novos prejuízos à população em torno (SONG, 2011), ou mesmo manter-se estável por um curto período de tempo, acarretando em novos danos a partir do seu rompimento (DUNNING et al., 2006). Independente do intervalo de tempo desde a formação inicial da barragem, é importante ressaltar que o risco à jusante existe, e tem uma ligação permanente com a estrutura da mesma (BROMHEAD; COPPOLA; RENDEL, 1996).

A organização do conjunto amostral, a partir de uma malha de pontos com resolução igual ao MDE, resultou em um total de 2.770 pontos. Desse total, 1.385 pontos, ou 50%, caracterizam-se como ocorrência de cicatrizes. Os outros 50%, foram pontos inseridos de forma aleatória em áreas de não ocorrência de movimento de massa. Posterior a isso, realizou-se a extração dos atributos do terreno.

4.2 Análise morfométrica das áreas de ocorrência de movimentos de massa

Na Tabela 4 estão expostos os 121 pontos de ruptura relacionados a cada um dos 11 atributos extraídos, permitindo verificar-se uma tendência de comportamento. Cada atributo foi dividido, de forma empírica, em intervalos que variam conforme a diferença total entre o valor mínimo e máximo.

Tabela 4 - Frequência de ruptura dos movimentos de massa para cada atributo do terreno.

Atributo	Intervalo	Quantidade	Mínima	Máxima	Média	Proporção (%)
Declividade (°)	<15	13	1,83	14,68	8,87	10,74
	15 -- 30	45	15,42	31,00	24,11	37,19
	31 -- 45	61	31,02	45,02	36,20	50,41
	46 -- 65	2	49,70	54,92	52,31	1,65
Elevação (m)	< 300	0	0,00	0,00	0,00	0,00
	301 -- 400	6	317,25	393,92	368,20	5,41
	401 -- 500	51	401,99	493,51	456,05	45,95
	500 -- 600	54	502,96	599,90	548,07	48,65
	> 600	10	602,61	658,88	617,38	9,01
Profundidade do Vale (m)	<50	13	11,11	49,63	35,23	10,74
	50 -- 100	41	51,21	97,41	75,68	33,88
	101 -- 150	28	104,71	142,26	120,50	23,14
	151 -- 200	31	150,60	200,04	174,82	25,62
	>200	8	203,65	225,99	217,04	6,61
Distância	<50	40	0,00	47,22	20,60	33,06

Vertical do Canal (m)	50 -- 100	42	50,00	99,87	71,55	34,71
	101 -- 150	29	101,46	150,07	121,21	23,97
	151 -- 200	5	157,69	187,14	170,08	4,13
	>200	5	201,83	210,35	207,59	4,13
Distância Horizontal do Canal (m)	<150	36	0,00	147,07	85,85	29,75
	150 -- 300	46	154,49	295,41	224,65	38,02
	301 -- 450	25	305,34	423,98	362,23	20,66
	451 -- 600	11	463,48	599,59	522,47	9,09
	>600	3	635,23	660,56	644,45	2,48
Distância Horizontal da Linha de Cumeada (m)	<150	16	81,93	147,07	121,97	13,22
	150 -- 300	46	154,49	295,41	225,34	38,02
	301 -- 450	35	301,66	444,58	370,14	28,93
	451 -- 600	21	463,48	590,82	510,43	17,36
	>600	3	628,15	687,66	657,47	2,48
Orientação do relevo (°)	Norte	0	0	0	0	0
	Nordeste	14	3,37	42,00	22,56	11,57
	Leste	29	54,05	129,73	88,47	23,97
	Sudeste	16	135,09	175,36	150,45	13,22
	Sudoeste	18	183,16	220,74	200,94	14,88
	Sul	0	0	0	0	0
	Oeste	34	226,06	310,00	269,42	28,10
	Noroeste	10	317,65	356,45	338,42	8,26
Fator Topográfico (LS)	0 -- 5	12	0,71	4,92	3,28	9,92
	6 -- 10	64	5,07	10,70	8,52	52,89
	11 -- 15	43	11,22	15,84	12,87	35,54
	>15	2	6,35	17,13	17,04	1,65
Índice topográfico de umidade (TWI)	0 -- 5	96	3,13	5,99	4,79	79,34
	6 -- 10	20	6,02	10,64	7,86	16,53
	11 -- 15	4	12,93	14,35	13,61	3,31
	16 -- 20	1	18,37	18,37	18,37	0,83

Fonte: Da autora (2018).

Analisando-se alguns atributos individualmente, percebe-se uma maior amplitude das ocorrências, a exemplo da declividade, em que 61 ocorrências de movimentos de massa tiveram sua ruptura no intervalo de 31 a 45°,

representando 50,41% das ocorrências. Outra grande parte das ocorrências tiveram sua ruptura no intervalo entre 15 e 30°, equivalendo a 37,19% do total.

Somando-se a representação dos dois intervalos com relação às ocorrências totais, pode-se afirmar que aproximadamente 88% das rupturas de movimento de massa ocorrem em declividades entre 15 e 45°. A análise individual da influência causada apenas por essa variável torna-se difícil, uma vez que sua relação com as demais é incontestável (FERNANDES et al., 2001).

Com relação à elevação, 51 ocorrências encontram-se no intervalo de 401 a 500 m, representando aproximadamente 46%. Além desse intervalo, no segmento de 501 a 600, tem-se a presença de 54 ocorrências de ruptura de movimento de massa. Ao todo, praticamente 95% das ocorrências totais foram deflagradas entre 401 e 600 m de elevação. É importante ressaltar que, embora a elevação do terreno tenha influência para a ocorrência de movimento de massa, não há um limitante relacionado a ela que indique o nível de suscetibilidade do local analisado (PINTO; PASSOS; CANEPARO, 2013).

Quanto à orientação do relevo, as áreas localizadas ao sul tendem a ser mais sombreadas, com exposição solar reduzida, ao contrário das localizadas ao norte (LIMA, 2013). Assim, entende-se que a maior ocorrência de ruptura deveria se dar ao sul, visto que a umidade no local seria maior, o que predispõe a área para esse tipo de evento. No entanto não foi possível realizar a identificação de um comportamento que leve às rupturas, uma vez que se tem registro de ocorrência em todas direções. Tem-se registro deste tipo de comportamento no estado de Santa Catarina, onde um modelo baseado em cicatrizes decorrentes do evento extremo de 2008, foi aplicado (PAULINO, 2013). Na ocasião foi constatado, pelo autor, a ocorrência de cicatrizes em todas as direções, com frequência superior nas vertentes da direção norte.

Referente ao índice topográfico de umidade (TWI), a maior concentração de ruptura está no limite abrangente de 0 a 5. Esse intervalo abrange 96

rupturas, representando aproximadamente 79% do total e esse índice, correlacionado com outros atributos como a forma do terreno, por exemplo, exerce alta influência sobre o poder erosivo do local (MINELLA e MERTEN, 2012).

Por sua vez, os autores citados defendem que o formato horizontal convergente do terreno tende a concentrar a umidade do solo. Além disso, a forma vertical convexa potencializa a suscetibilidade de fluxo de detrito no terreno. No entanto, conforme é possível verificar na Tabela 5, esse não foi o tipo de comportamento encontrado na área de estudo. Sendo a forma do terreno do tipo divergente-côncava, é responsável por 62 das 121 rupturas de movimento de massa local, abrangendo 51,24% do total das ocorrências. Ressalta-se, no entanto, a importância de manter os dados observados, uma vez que o objetivo do presente estudo é justamente a identificação de áreas suscetíveis a este tipo de evento.

Tabela 5 – Frequência de rupturas de movimento de massa com relação à forma do terreno

Forma do Terreno	Quantidade de Rupturas	Proporção (%)
Divergente- Côncava	62	51,24
Divergente -Convexa	2	1,65
Convergente-Convexa	57	47,11

Fonte: Da autora (2018).

4.3 Modelagem de áreas suscetíveis a movimento de massa

Após a organização das amostras, realizou-se a modelagem matemática a partir das RNA. Testou-se 90 configurações diferentes, sendo que apenas duas delas foram selecionadas: a 43ª foi a primeira escolha, sendo a segunda a 24ª configuração. Na Tabela 6 estão expostas as características das duas configurações. Os critérios de seleção basearam-se no índice de informação de Akaike (AIC), que sugere um modelo simples com bons resultados, sendo que

esse índice é expresso por valores negativos em que, quanto menor o valor, melhor a eficiência do modelo (AKAIKE, 1974). O segundo modelo escolhido baseou-se na acurácia (AUC), que é basicamente o quão perto dos valores reais os valores encontrados estão.

Tabela 6 – Características das configurações selecionadas.

Características	24ª configuração	43ª configuração
Etapas	3	5
Subetapas	4	3
<i>Inputs</i>	9	7
Neurônios	10	7
Iteração	10	13
Ciclos	1311	1262
Erro Absoluto Médio	0,177378	0,199572
Nash Sutcliffe	0,609925	0,581748
AUC	0,928636	0,928196
Akaike Criterion - AIC	-1402,94	-1405,62

Fonte: Da autora (2018).

A partir dos dados expostos na tabela acima é possível confirmar que o modelo 43 de fato tem uma configuração mais simplificada do que o modelo 24. O 24º modelo foi gerado na terceira etapa, em sua quarta subetapa. Dos 11 *inputs* inseridos inicialmente, dois já haviam sido vetados anteriormente, devido à baixa influência apresentada nas primeiras etapas. Os nove *inputs* que compuseram essa etapa foram: elevação, declividade, profundidade do vale, distância horizontal dos topos de morro e linha de cumeada, distância vertical do canal, orientação do terreno, fator LS, curvatura horizontal e índice topográfico de umidade (TWI). Quanto à outra configuração escolhida, sua geração ocorreu na quinta etapa da RNA, em sua terceira subetapa. Além dos atributos já vetados na configuração anteriormente expostas, obteve-se ainda o corte da curvatura horizontal do terreno e do TWI. Logo, o presente modelo contou com a atuação de sete dos 11 *inputs* iniciais.

Com relação à quantidade de neurônios utilizada na camada oculta em cada modelo, ressalta-se que não há uma regra ou determinação fixa, sendo que grande parte dos estudos estipula-os de forma empírica (COSTA, 2012). Os *inputs* utilizados na entrada das RNA estarão conectados a cada um dos neurônios da camada oculta que, por sua vez, sofrerão estímulos que definirão seus pesos sinápticos. Dessa forma, cada neurônio resultará em uma ou várias saídas, conectando-se em outros neurônios (HAYKIN, 2001). Assim, quanto maior a quantidade de neurônios na camada oculta da RNA, maior o número de conexões possíveis, bem como seu grau de complexidade. No entanto, Costa (2012) ressalta que o ideal é encontrar um equilíbrio, não sendo uma rede extremamente complexa ou simples.

Ao evidenciar o modelo 43, nota-se que sua quantidade de iterações é superior ao modelo 24. Ou seja, para que fosse encontrada uma boa correlação entre *inputs* e neurônios, o primeiro necessitou reiniciar a rede por 13 vezes, ao passo que o modelo 24 encontrou sua maior confiabilidade na décima iteração. De modo geral, a iteração mostra o quão próximo o valor de saída encontrado está do valor inicial, gerando uma diferença entre eles, caracterizado como erro absoluto médio. Visando a uma diminuição do erro encontrado, inicia-se uma nova iteração (COSTA, 2012).

O autor ainda cita que, para a diminuição do erro encontrado ocorrer, a RNA faz o caminho inverso a partir da utilização do algoritmo retropropagativo, dando novos pesos às variáveis de entrada. Cada retropropagação da rede é definida como ciclo, que se reiniciam de forma aleatória até sua convergência - o encontro do melhor caminho possível. Logo, quanto maior o número de ciclos dentro de uma iteração, mais distante do caminho esperado estava a RNA.

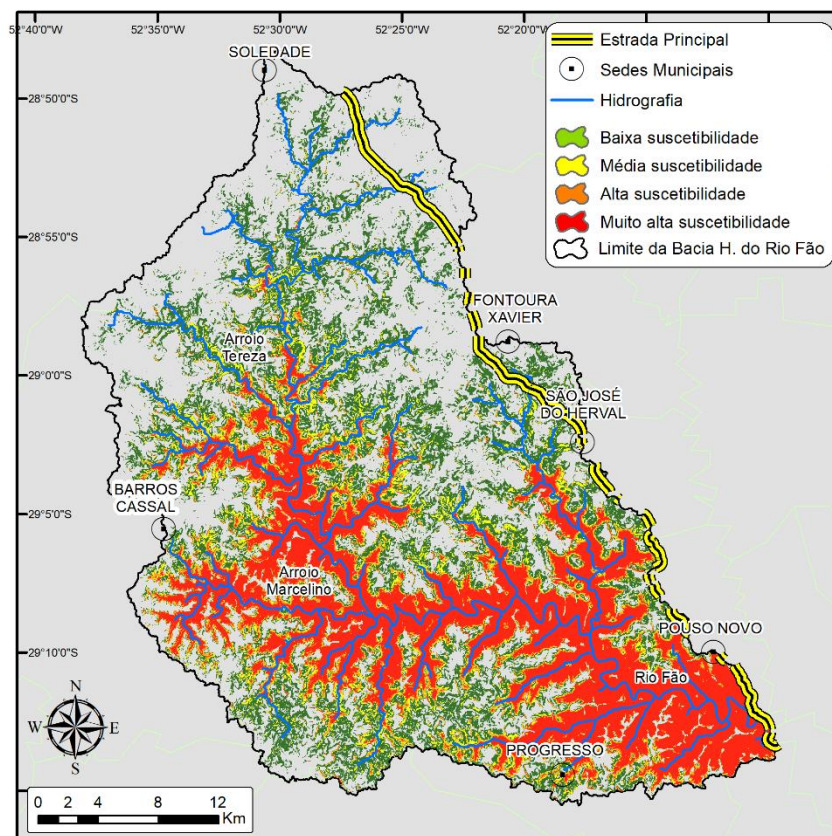
Assim como cada elemento constituinte das RNA indica a superioridade ou inferioridade de cada configuração, coeficientes de eficiência como o Nash-Sutcliffe, também auxiliam na classificação dos modelos. Nesse quesito em particular, o ideal é que o valor seja igual ou superior a zero, para demonstrar

eficiência em seus resultados (NASH; SUTCLIFFE, 1970). Afirma-se dessa forma que ambos os modelos selecionados estão de acordo com o proposto.

4.4 Elaboração dos mapas de suscetibilidade a movimentos de massa, análise das áreas suscetíveis e diretrizes para uso e ocupação local

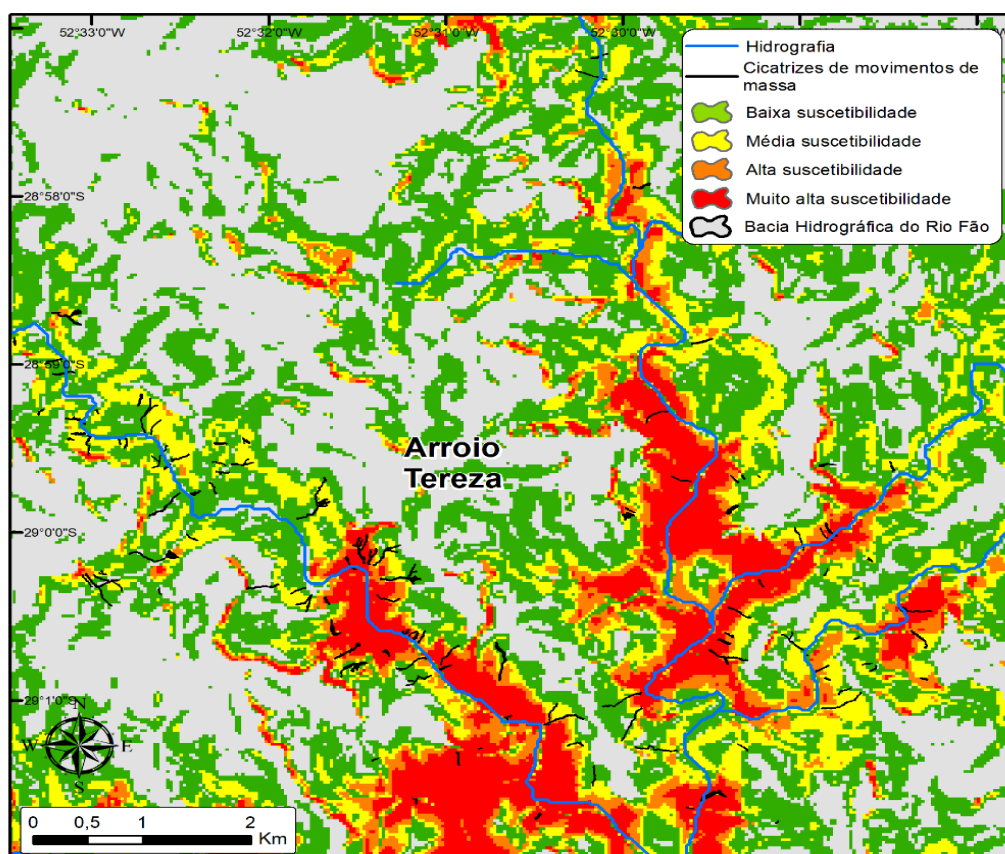
Após análise aprofundada das configurações escolhidas, gerou-se o primeiro mapa de suscetibilidade a movimento de massa, com base no AIC (Figuras 16 e 17). Conforme citado anteriormente, o intuito desse mapa foi obter um conjunto de dados mais parcimonioso, mostrando eficácia no resultado por meio de um modelo simplificado. A divisão das áreas de suscetibilidade a movimentos de massa da bacia se deu de forma empírica, sendo possível sua classificação em quatro diferentes classes. As classes de suscetibilidade foram definidas como: baixa, média, alta e muito alta suscetibilidade.

Figura 16 – Mapa de suscetibilidade a movimento de massa, a partir do índice de critério de Akaike (AIC).



Fonte: Da autora (2018).

Figura 17 – Detalhamento da área com presença de cicatrizes de



movimento de massa a partir do AIC.

Fonte: Da autora (2018).

A área suscetível total gerada a partir do presente mapa é de aproximadamente 723 Km², o equivalente a 56,08% da bacia hidrográfica do Rio Fão. Analisando-se as classes de suscetibilidade em separado, as áreas referentes à baixa suscetibilidade abrangem 21,50% da área total, o equivalente a 277 Km². Em seguida, a classe caracterizada por média suscetibilidade totaliza 79,27 Km², representando 6,14% da área de estudo. Por fim, as classes de alta e muito alta suscetibilidade resultam em 366,82 Km², correspondendo à maior porção das áreas suscetíveis, com cerca de 24% da área total demarcada.

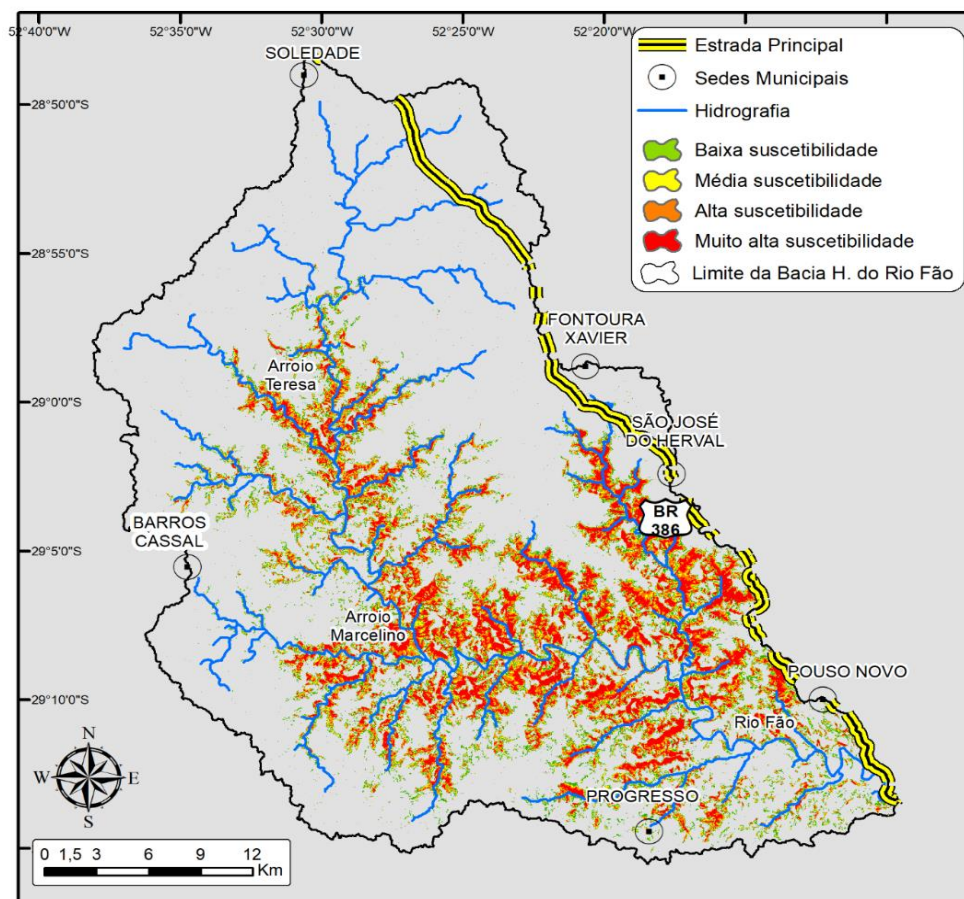
No entanto, ao analisar visualmente o mapa gerado, pode-se perceber uma tendência de concentração das áreas de alta suscetibilidade nos fundos de vale, circundando a hidrografia local. De acordo com Bozdongan (1987), esse tipo de comportamento pode ser justificado pelo fato de que o AIC busca o

máximo da função de verossimilhança e, como consequência, acaba gerando um comportamento forçado em áreas mais declivosas, o que foge da realidade da área de estudo.

A notória tendência de comportamento pode ser comprovada ao analisar a região com cicatrizes de movimento de massa, em particular. O entorno do Arroio Tereza é o local com maior número de cicatrizes da área do estudo como um todo. No entanto, de acordo com o presente cenário, grande parte delas encontram-se em áreas de baixa e média suscetibilidade, não apresentando correlação entre os resultados encontrados e a realidade observada.

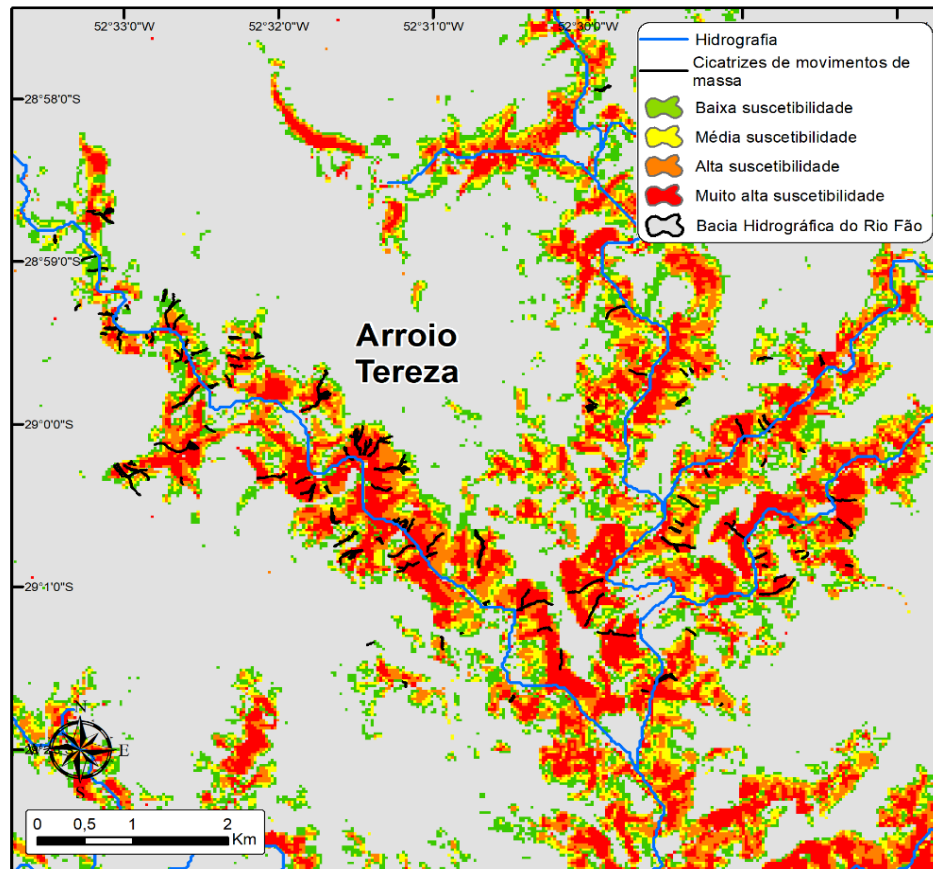
A geração do segundo mapa teve como critério de escolha a acurácia (AUC) e, para tanto, utilizou-se a 24ª configuração. Assim como o anterior, esse mapa também foi dividido em quatro classes de suscetibilidade (Figuras 18 e 19).

Figura 18 - Mapa de suscetibilidade à movimento de massa a partir da acurácia (AUC).



Fonte: Da autora (2018).

Figura 19 - Detalhamento da área com presença de cicatrizes de



movimento de massa a partir da AUC

Fonte: Da Autora (2018).

O segundo cenário apresentou área total de suscetibilidade igual a 289 Km², o equivalente a 22,40% da área total da bacia hidrográfica do Rio Fão. Desse total, cerca de 6%, ou 77,83 Km², referem-se às áreas de baixa suscetibilidade. As áreas de média suscetibilidade representam 3,83% da região estudada, abrangendo 49,38 Km². A abrangência das áreas de alta suscetibilidade estende-se por cerca de 66 Km², representando um total de 5,11%. Por fim, as áreas de muito alta suscetibilidade são constituídas por 95,84 Km², ou 7,43% da área total.

Se somadas as áreas de alta e muito alta suscetibilidade, elas ficam responsáveis por 12,54% da área de estudo, praticamente a metade do montante encontrado no mapa anterior. A partir de uma análise visual, pode-se verificar que as demarcações de áreas suscetíveis têm comportamentos diferentes entre os dois mapas, sendo que o segundo mapa demonstra mais coerência com o que pode ser observado em campo.

Assim como o mapa anterior, esse também tem a demarcação das áreas suscetíveis em torno da sua hidrografia. O que se verifica, no entanto, é que o comportamento do segundo cenário não apresenta uma linha de tendência fortemente demarcada nos fundos do vale como exposto anteriormente. Como consequência já esperada, o modelo selecionado, devido ao melhor AUC, apresentou áreas de suscetibilidade com homogeneidade superior, expondo as classes selecionadas de maneira mais branda.

A fim de visualizar a abrangência de cada classe de suscetibilidade por município, optou-se por elaborar-se uma tabela com os valores em separado. Na Tabela 7, pode-se verificar a área total do município, dentro da bacia hidrográfica do Rio Fão, além das proporções das respectivas classes de suscetibilidade a movimento de massa.

Tabela 7 - Relação entre a área total dos municípios e as áreas suscetíveis a movimentos de massa na bacia hidrográfica do Rio Fão.

Município	Área total* (Km ²)	Baixa (Km ²)	Média (Km ²)	Alta (Km ²)	Muito Alta (Km ²)	Proporção ** (%)
Soledade	202,62	3,33	2,13	2,76	3,58	5,83
Boqueirão do Leão	9,50	0,31	0,12	0,12	0,07	6,53
Marques de Sousa	27,46	2,20	0,96	0,88	0,43	16,27
Barros Cassal	336,46	18,41	10,52	12,91	14,61	16,78
Fontoura Xavier	421,54	25,43	17,94	25,26	38,17	25,34
Progresso	176,05	17,46	10,53	13,69	20,41	35,26
Pouso Novo	60,05	6,85	4,21	5,49	8,58	41,85
São José do Herval	51,51	3,85	2,97	4,87	9,98	42,06

*Área total do município abrangida pela bacia hidrográfica do rio Fão; **Proporção do somatório das áreas de suscetibilidade com relação à área total.

Fonte: Da autora (2018).

Com base nos dados expostos na tabela, verifica-se que, apesar do município de Fontoura Xavier ser o que tem maior porção territorial dentro dos limites da bacia hidrográfica do Rio Fão, a proporção de áreas suscetíveis não apresenta relação. Da mesma forma o contrário acontece, visto que São José do Herval apresenta a maior proporção de áreas suscetíveis, superior a 42%, com uma das menores áreas territoriais dentre os municípios observados.

O município de Soledade, por sua vez, apresenta a menor proporção de áreas suscetíveis, inferior a 6% do seu território total. Com uma margem aproximadamente três vezes maior, tem-se o município de Barros Cassal. Apesar das proporções encontradas, um ponto importante a ser ressaltado é que, se analisada as cicatrizes decorrentes de movimentos de massa presentes na área de estudo, a maioria está localizada nos municípios de Barros Cassal, Fontoura Xavier e Soledade. Os três municípios estão localizados ao norte da bacia, no entorno do Arroio Tereza, com curvatura de terreno semelhante à um anfiteatro, o que acaba auxiliando na ocorrência desse tipo de evento.

Ressalta-se que, assim como a área de estudo, pertencente ao Planalto Meridional, na Serra Geral, outras regiões com a mesma formação já sofreram com eventos semelhantes ao de janeiro de 2010, como por exemplo: no ano de 2000, no vale do rio Forromeco, nos municípios de São Vendelino e Alto Feliz (SILVEIRA, 2008; BRESSANI; SILVEIRA; MARTINELLO, 2009); em 2007, no vale do Rio Maquiné, no município de Maquiné (MONGUILHOTT, 2008); e a mais recente em 2017, nos vales dos rios Rolante e Mascarada, nos municípios de Rolante e Riozinho (DRH-SADS, 2017).

Ainda que analisados os atributos do terreno com maior atenção, e por vezes encontrando uma linha de tendência que possa auxiliar no desencadeamento de movimentos de massa, a cobertura e de utilização do solo local é um fato de extrema importância, devido à propensão de solos com ausência de vegetação se tornarem mais suscetíveis a esse tipo de evento. Frente a isso, definiu-se diretrizes de utilização para cada classe de suscetibilidade (Quadro 4).

Quadro 4 – Diretrizes para utilização do solo da bacia hidrográfica do rio Fão, de acordo com cada classe de suscetibilidade.

Classe de suscetibilidade	Diretrizes para utilização do solo
---------------------------	------------------------------------

Baixa	Áreas que permitem o desenvolvimento urbano ou cultivo, desde que sejam respeitadas as fragilidades naturais do terreno, evitando cortes e aterros que possam desencadear algum tipo de movimento de massa, tanto para antigas instalações, quanto para novas instalações. Caso contrário, a baixa suscetibilidade da área pode ser agravada devido a utilização imprópria, e principalmente, por eventos naturais extremos, como por exemplo, chuvas intensas.
Média	Terrenos suscetíveis a movimentos de massa, principalmente em áreas de relevo com declividades mais acentuadas se usadas de forma indevida, ou com supressão de vegetação natural. Áreas com relevos suavizados, e declividade inferior a 15°, podem ser utilizadas para a urbanização e/ou cultivo desde que seguindo restrições que atendam as fragilidades naturais do local.
Alta	Terrenos destinados a implantação ou manutenção de áreas de preservação. Devido à instabilidade local, são impróprios para o desenvolvimento urbano com características naturais que propiciam a ocorrência de movimento de massa. Para as instalações já consolidadas, indica-se não realizar cortes no terreno, bem como, não realizar a supressão vegetal do entorno.
Muito Alta	

Fonte: Da autora (2018).

As diretrizes para uso e ocupação de solo visam à prevenção para futuras instalações, ou mesmo a mitigação dos possíveis danos à população já instalada, uma vez que diversas famílias residentes na bacia hidrográfica do rio Fão já sofreram com prejuízos decorrentes de desastres desta natureza. De maneira geral, a população prefere optar pela alocação nos fundos de vale, agravando os danos decorrentes de eventos extremos.

Ressalta-se, no entanto, que grande parte das áreas já impactadas pela ocorrência de movimento de massa, em um passado recente, tem como forma predominante a presença de cobertura vegetal em diferentes estágios, ou ainda

a prática agrícola ou de pastagem para abastecimento familiar. O desenvolvimento urbano ainda é escasso, com a presença de pequenas comunidades rurais.

Assim sendo, perante os resultados obtidos, pode-se afirmar a importância da compreensão dos atributos extraídos do terreno, bem como a realização de sua análise morfométrica, técnicas de modelagem e mapeamento de áreas suscetíveis, uma vez que este tipo de estudo pode expor condicionantes despercebidas em um primeiro momento. Para tanto, nota-se ainda que o aperfeiçoamento de técnicas é possível, por meio da utilização de uma gama maior de variáveis ou mesmo a obtenção de novos dados a partir de técnicas de sensoriamento remoto, resultando assim em um aperfeiçoamento nas áreas suscetíveis a movimento de massa.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi possível realizar a identificação de 121 cicatrizes decorrentes de movimento de massa, originadas no evento dos dias 03 e 04 de janeiro de 2010, na área de estudo, totalizando 27,3 hectares. As cicatrizes tiveram em média 220 m de comprimento, com variação entre 13 e 1000 m. Das 121 cicatrizes identificadas, a grande maioria localiza-se nos limites de Barros Cassal, Fontoura Xavier e Soledade, municípios localizados ao norte da bacia, no entorno do Arroio Tereza.

Após a identificação visual, foram utilizados dados SRTM para o modelo digital de elevação (MDE), visando à extração de treze atributos do terreno, para posterior modelagem matemática e mapeamento das áreas suscetíveis a fluxo de detritos na bacia hidrográfica do Rio Fão. A análise morfométrica visou aos locais identificados anteriormente, com presença de cicatrizes decorrentes desse tipo de evento, verificando-se os pontos de ruptura de cada uma delas.

Com o auxílio do software ArcGis, realizou-se o preenchimento das cicatrizes existentes com uma malha de pontos, cada qual referente a um pixel do MDE selecionado. Ao total foram 2.770 amostras, sendo 50% referente à ocorrência de cicatrizes e os outros 50% a não ocorrências. Após a organização das amostras, realizou-se a modelagem matemática da área, a partir da

utilização de redes neurais artificiais. Com a utilização de um algoritmo retropropagativo a cada nova etapa, os pesos sinápticos de cada atributo foram alterados, e o atributo com menor influência no modelo era descartado para posterior continuidade.

Ao final da modelagem obteve-se 90 configurações diferentes, sendo que a 24ª configuração apresentou melhor resultado. Para tanto, essa configuração utilizou nove variáveis do terreno das onze extraídas, sendo elas: elevação, declividade, profundidade do vale, distância horizontal dos topos de morro e linha de cumeada, distância vertical do canal, orientação do terreno, fator LS, curvatura horizontal e índice topográfico de umidade (TWI).

Com base nos dados obtidos realizou-se o mapeamento das áreas suscetíveis da bacia, divididas de forma empírica, podendo ser classificadas em baixa, média, alta ou muito alta suscetibilidade. Ao todo foram identificados aproximadamente 290 Km² de área suscetível a movimentos de massa, sendo que, desse montante, cerca de 96 Km² caracterizam-se como área de muito alta suscetibilidade.

Dois oito municípios que a bacia hidrográfica do Rio Fão abrange parcialmente, o município de São José do Herval, com território aproximado de 51 Km², apresentou 42% da área como tendo alguma classe de suscetibilidade. Conforme exposto anteriormente, a maioria das cicatrizes estão localizadas nos municípios de Barros Cassal, Fontoura Xavier e Soledade, este último com apenas 5,83% da área total apresentando algum tipo de suscetibilidade.

A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que as áreas com cicatrizes decorrentes de movimento de massa estão localizadas em locais onde a angulação do rio é fechada, com formato do terreno semelhantes a anfiteatros. Tais áreas estão localizadas nas escarpas erosivas do Planalto Meridional, na Serra Geral, que apresentam características morfológicas capazes de auxiliar na ocorrência de fluxo de detrito, visto que pelo menos outros três episódios semelhantes a esse já aconteceram em diversas regiões do Estado.

Frente a isso ressalta-se a importância de pesquisas aprofundadas em extração de atributos e análises morfométricas, uma vez que alguns aspectos despercebidos em um primeiro momento podem influenciar efetivamente no desencadear de eventos dessa natureza. Além disso, a complementação com outras variáveis ou técnicas de sensoriamento remoto podem influenciar significativamente o aprimoramento dos resultados obtidos.

Por fim, vale evidenciar a relevância de estudos em escala regional, visando a um planejamento municipal correto e eficiente, buscando a prevenção de gastos desnecessários direcionados à recuperação da cidade após desastres, por exemplo. Além do mais, o mapeamento de áreas suscetíveis e o cumprimento do uso e ocupação devido do solo podem servir como base para a orientação do crescimento urbano e rural, principalmente ao se tratar de áreas que frequentemente são atingidas por desastres dessa natureza.

REFERÊNCIAS

AKAIKE, H. **A new look at the statistical model identification**. IEEE Trans. Autom. Control 19 (6), 716–723, 1974.

AUGUSTO FILHO, Ornelas. Caracterização geológico-geotécnica voltada à Estabilização de Encostas: uma proposta metodológica. In: Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas, Rio de Janeiro. **Anais...** v. 2, p. 721-733, 1992.

AUGUSTO FILHO, Ornelas. **Mass movements susceptibility map of highway system using GIS technology**: a case study in Brasil. Geoline 2005, p. 1-11.

AYALEW, Lulseged; YAMAGISHI, Hiromitsu. **The Application of GIS-based Logistic Regression for Landslide Susceptibility Mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan**. Niigata University, Departamen of Environmental Science, Ikakashi, 2-no-cho 8050, Niigata, 9502181, Japan, 2004.

BALZA, Guilherme. Chuva em Santa Catarina mata mais de 120 pessoas; tragédias naturais castigam vários pontos do mundo. **UOL**. 2008. Disponível em: <<https://noticias.uol.com.br/especiais/retrospectiva-2008/ultnot/2008/12/16/ult7037u9.jhtm>>. Acesso em: 12 mai. 2017.

BITAR, Osmar Y. **Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações**: 1:25.000 (livro eletrônico): nota técnica explicativa. São Paulo: IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo; Brasília, DF: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2014. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/bitstream/handle/doc/16588/NT-Carta_Suscetibilidade.pdf?sequence=1>. Acesso em: 12 set. 2017.

BODSDONGAN, H. Model selection and Akaike's Information Criterion (AIC): The general theory and its analytical extensions. **Psychometrika**. v. 52, n. 3, 345-370, Sep. 1987.

BRASIL. MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. **Política Nacional da Defesa Civil**. Brasília: Secretaria Nacional da Defesa Civil, 2007, 87 p. Disponível em: <http://www.mi.gov.br/c/document_library/get_file?uuid=6aa2e891-98f6-48a6-8f47-147552c57f94&groupId=10157>. Acesso em: 15 out. 2017.

BRASIL. MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. Secretaria Nacional de Defesa Civil. Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres.

Anuário brasileiro de desastres naturais: 2011 / Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres. - Brasília: CENAD, 2012. 80 p.

BRESSANI, Luiz A.; COSTA, Eli A. Mapeamento geotécnico: suscetibilidade, perigo, vulnerabilidade técnica, risco e risco instalado. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABGE, 2013.

BRESSANI, Luiz A., SILVEIRA, R. M.; MARTINELLO, I. A. Análise de uma ruptura de talude íngreme em solo coluvionar de São Vendelino, RS. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 2009, São Paulo. **Anais...** São Paulo, ABMS, p. 149-157, 2009.

BROMHEAD, E. N.; COPPOLA, L.; RENDELL, H. M. Field reconnaissance of valley blocking landslide remnants: the Cordevole and Piave catchments. **Journal of the Geological Society of China**, 1996. p. 373-89.

BUENO, Fabrício. Métodos Heurísticos: teoria e implementações. **IFSC**, Araranguá- SC, 2009. Disponível em: <https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/images/b/b7/Tutorial_m%C3%A9todos_heur%C3%ADsticos.pdf>. Acesso em: 30 out. 2017.

BUI, Dieu T.; PRADHAN, Biswajeet; LOFMAN, Owe; REVHAUG, Ing. **Landslide Susceptibility Assessment in Vietnam Using Support Vector Machines, Decision Tree, and Naïve Bayes Models**. Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering, 2012, 26 p.

BURROUGH, P. A. **Principles of geographical information systems of land resources assessment**. Francis & Taylor, 1986.

BURTON, I.; KATES, R. W.; WHITE, G. F. **The environment as hazard**. New York: Oxford Univ. Press, 1978.

CÂMARA, G. Anatomia de um SIG. **Revista Fatos GIS**, n. 4 p.11-15, 1194.

CARRARA, A., CARDINALI, M., DETTI, R., GUZZETTI, F., PASQUI, V., REICHRNBACH, P. **GIS Techniques and Statistical Models in Evaluating Landslide Hazard**. Earth Surface Processes and Landforms, 1991, 16: 427-445.

CASTRO, Antonio L. C. **Manual de planejamento em defesa civil**. v.1. Brasília: Ministério da Integração Nacional/Departamento de Defesa Civil, 1999.

CHAGAS, César. da S. **Mapeamento digital de solos por correlação ambiental e redes neurais artificiais em uma bacia hidrográfica no domínio de mar de morros**. Viçosa: UFV, 2006. 238 fl. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de

Plantas, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006. Disponível em: <<http://alexandria.cpd.ufv.br:8000/teses/solos%20e%20nutricao%20de%20plantas/2006/196516f.pdf>>. Acesso em: 15 jan. 2018.

CHEN, Wei; POURGHASEMI, Hamid R.; KORHEJADY, Aiding; ZHANG, Ning. **Landslide spatial modeling: Introducing new ensembles of ANN, MaxEnt, and SVM machine learning techniques**. Geoderma, nº 305, 2017.

COSTA, Luis A. N. **Aplicação de redes neurais artificiais no processo de ajuste de histórico**. Campinas: UEC, 2012. 169 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Petróleo) - Programa de Pós-graduação em Ciências e Engenharia de Petróleo, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/263678/1/Costa_LuisAugustoNagasaki_M.pdf>. Acesso em: 12 jan. 2018.

CENTRE FOR RESEARCH ON THE EPIDEMIOLOGY OF DISASTERS. **The international disaster database**. 2017. Disponível em: <<http://www.emdat.be/database>>. Acesso em: 10 set. 2017.

CAS, Rodrigo da. **Estudo da influência da PCH Salto Forqueta na enchente de 04 de janeiro de 2010**. Lajeado: Univates, 2015. 105 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Taquari - Univates, Lajeado, jun. 2015. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10737/988>>. Acesso em: 12 set. 2017.

DEFESA CIVIL DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL. S2ID: Sistema Integrado de Informações sobre Desastres. **S2ID**. 2018. Disponível em: <<https://s2id.mi.gov.br/>>. Acesso em: 10 set. 2017.

DRH-SADS. Departamento de Recursos Hídricos – Secretaria do Ambiente e Desenvolvimento Sustentável do Rio Grande do Sul. 2017. **Diagnóstico preliminar descritivo dos eventos ocorridos no dia 05 de janeiro de 2017 entre as regiões dos municípios de São Francisco de Paula e Rolante/RS**. Porto Alegre, DRH-SADS, 26p.

DESMET, P.J.; GOVERS, G. A. **GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units**. J. Soil Water Conserv., 51:427-433, 1996.

DIAS, Maria, A.F.S. Eventos Climáticos Extremos. **REVISTA USP**, São Paulo, n. 103, p. 33-40, 2014.

DIETRICH, W. E.; MONTGOMERY, D. R. **SHALSTAB**: a digital terrain model for mapping shallow landslide potential. NCASI (National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement) Technical Report, 1998, 29p.

DOURADO, Francisco; ARRAES, Thiago C.; SILVA, Mariana F. O megadesastre na Serra do Rio de Janeiro – as causas do evento, os mecanismos do movimento e a distribuição especial dos investimentos de reconstrução pós-desastre. Anuário do Instituto de Geociências. **UFRJ**. 2012. Disponível em: <<https://revistas.ufrj.br/index.php/aigeo/article/view/6935/5502>>. Acesso em: 12 jan. 2018.

Dunning, S.A., Rosser, N.J., Petley, D.N. et al. **Landslides: Formation and failure of the Tsatichhu landslide dam, Bhutan**. P. 107-113, 2006.

EM-DAT. The International Disaster Database. **Emdat**. Disponível em: <<https://www.emdat.be/>>. Acesso em: 12 mar. 2018.

FARAH, Flávio. **Ocupação urbana e instabilidade de encostas**. Coleção Habitar – habitação e encostas. São Paulo: IPT, 2003.

FELL, Robin; COROMINAS, Jordi; BONNARD, Cristophe; CASCINI, Leonardo; LEROI, Eric; SAVAGE, William, Z. **Guidelines for Landslide Susceptibility, Hazard and Risk Zoning for Land Use Planning**. Engineering Geology, n. 102, 2008.

FERNANDES, N. F.; AMARAL, C. P. **Movimentos de massa**: uma abordagem geológico-geomorfológica. In: Guerra, A. J. T.; Cunha, S. B. Geomorfologia e meio ambiente. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996. Cap. 3, p. 123-194.

FERNANDES, N. F.; AMARAL, C. P. **Movimentos de massa**: uma abordagem geológico-geomorfológica. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. Geomorfologia e meio ambiente. 4.ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2003. p. 123-194.

FERNANDES, N. F.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T.; VIEIRA, B. C.; MONTGOMERY, D. R.; GREENBERG, H.; GREENBERG, H. Condicionantes geomorfológicos dos movimentos nas encostas: avaliação de metodologias e aplicação de modelo de previsão de áreas suscetíveis. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 2, n. 1, p. 51-71, 2001.

FERRI, Gino; TOGNI, Ana C. **A história da bacia hidrográfica Taquari-Antas**. Lajeado: Univates, 2012.

FREIRE, E.S.M. Movimento Coletivos de Solos e Rochas e sua Moderna Sistemática. **Construção - Rio de Janeiro**, n. 8, p.10-18, 1965.

GERSCOVICH, Denise. **Estabilidade de Taludes**. São Paulo: Ed. Oficina de Textos, 2012.

GOODMAN, R.E.; BRAY, J.W. **Toppling of Rock Slopes**. Proc. Specialty Conference on Rock Engineering for Foundations and Slopes. Boulder, Colorado, ASCE v. 2, p. 201-234, 1976.

GUIDICINI, Guido; NIEBLE, Carlos M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. São Paulo: Edgard Blücher, 1993.

GUIDICINI, Guido; NIEBLE, Carlos M. **Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação**. 2. ed. São Paulo: Edgar Blücher, 1984.

GUZZETTI, F; CARRARA, A.; CARDINALI, M.; REICHENBACH, P. **Landslide hazard evaluation: a review of currentt chinese and their application in a multiscalestudy**, Central Italy. *Geomorphology*. v. 31. p. 181-216, 1999.

HAYKIN, Simon. **Redes neurais artificiais: princípios e prática**. 2. ed. Porto Alegre: Bookmans, 2001.

HEWITT, K. **The idea of calamity in a technocratic age**. In: HEWITT, K. (Ed.) *Interpretations of calamity: from the viewpoint of ecology*. London: Allen and Unwin, 1983. p. 3-32.

HIGHLAND, L.M., BOBROWSKY, Peter. **The landslide handbook - A guide to understanding landslides**. Reston, Virginia, U.S. Geological Survey Circular 1325, 129 p., 2008.

HUTCHINSON, John, N. **Mass Movement**. In: *Encyclopedia of Geomorphology*. Nova York: Fairbridge Renhold Book, 1968.

INFANTI JÚNIOR, N.; FORNARI FILHO, N. **Processos da Dinâmica Superficial**. In: Oliveira A.M.S.; Brito, S.N.A. (eds) *Geologia de Engenharia*. São Paulo: ABGE, 1998, p. 131-152.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Cidades**. 2018. Disponível em:<<https://cidades.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 30 out. 2017.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DE SÃO PAULO- IPT. **Guia Cartas geotécnicas: orientações básicas aos municípios / autores e organizadores Omar Yazbek Bitar, Carlos Geraldo Luz de Freitas, Eduardo Soares de Macedo**. -- São Paulo, 2015.

JULIÃO, Pedro R.; NERY, Fernada; RIBEIRO, José L.; BRANCO, Margarida C.; ZÊZERE, José, L. **Guia metodológico para a produção de cartografia municipal de risco e para a criação de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) de base municipal**. Lisboa: Autoridade Nacional de Protecção Civil; DirecçãoGeral do Ordenamento do Território e Desenvolvimento Urbano; Instituto Geográfico Português, 2009.

KANUNGO, D.P.; ARORA, M.K.; SARKAR S.; GUPTA R.P. A comparative study of conventional, ANN black box, fuzzy and combined neural and fuzzy weighting procedures for landslide susceptibility zonation in Darjeeling Himalayas.

Engineering Geology, n. 85, 2006.

KASABOV, N. **Foundations of Neural Networks, Fuzzy Systems and Knowledge Engineering**. Cambridge: Massachussets institue of technology, 1998.

KLEINPAUL, Joel J. **Análise Multitemporal da Cobertura Florestal da Microbacia do Arroio Grande, Santa Maria, RS**. Santa Maria: UFSM, 2005. 14f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005. Disponível em: <<http://repositorio.ufsm.br/handle/1/8615>>. Acesso em: 30 out. 2017.

KOBIYAMA, Masato; MENDONÇA, Magali; MORENO Anderson D.; MARCELINO, Isabela, P. V. O.; MARCELINO, Emerson V.; GONÇALVES, Edson F.; BRAZETTI, Letícia L.P.; GOERL, Roberto F.; MOLLERI, Gustavo S.F.; RUDOFF, Frederico M. **Prevenção de Desastres Naturais: conceito básicos**. Curitiba: Ed. Organic Trading, 2006.

LEITE, Emerson F.; ROSA, Roberto. Mapeamento Geomorfológico: A Carta de Energia do Relevo da Bacia hidrográfica do Rio Formiga- TO. **Revista Brasileira de Geografia Física**, n. 02, 2012.

LIMA, Andreia Medeiros de. **Relação clima e vegetação na área das bacias das usinas hidrelétricas de Barra dos Coqueiros e Caçu-GO**. 2013. 93 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Goiás, Jataí, 2013. Disponível em: <<http://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/3142>>. Acesso em: 08 jun. 2017.

LOPES, Eymar S.S. **Modelagem Espacial Dinâmica Aplicada ao Estudo de Movimentos de Massa em uma Região da Serra do Mar Paulista, na escala 1:10.000**. Rio Claro: UNESP, 2006. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) - Centro de Geociências e Ciências Exatas, Campus Rio Claro, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2006. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/102962?show=full>>. Acesso em: 30 out. 2017.

MARENGO, J. A.; SCHAEFFER, R.; PINTO, H.S.; ZEE, D.M.W. Mudanças climáticas e eventos extremos no Brasil. **CETESB**. Rio de Janeiro: FBDS, 2009. Disponível em: <<http://cetesb.sp.gov.br/proclima/2009/05/12/mudancas-climaticas-e-eventos-extremos-no-brasil/>>. Acesso em: 12 jun. 2017.

MATA-LIMA, Herlander; BORBA, Andreilcy A.; PINHEIRO, Adilson; MATA-LIMA, Abel; ALMEIDA, José A. **Impactos dos desastres naturais nos sistemas ambiental e socioeconômico: o que faz a diferença?** Ambient. soc. vol.16 n. 3. São Paulo July/Sept. 2013.

MCCULLOCH, Warren S.; PITTS, Walter. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. December 1943, v. 5, Issue 4, p. 115–133.

MIKHAIL, E.; ACKERMAN, F. **Observations and Least Squares**. University Press of America, 1976.

MINELLA, Jean P. G.; MERTEN, Gustavo H. Índices topográficos aplicados à modelagem agrícola e ambiental. **Ciência Rural**, vol.42, n. 9, Santa Maria, set. 2012. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782012000900010>. Acesso em: 12 jan. 2018.

MONGUILHOTT, Michele. **Estudo de áreas suscetíveis a movimentos de massa na rodovia RS/486 Rota do Sol**. Porto Alegre: UFRGS, 2008. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008. Disponível em: < <http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/14884>>. Acesso em: 12 ago. 2017.

MOORE, I. D.; GEISSLER, P. E.; NIELSEN, G. A.; PETERSON, G. A. Soil attribute prediction using terrain analysis. **Soil Science Society of America Journal**, v. 57, p. 443-452, 1993.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part 1: a discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v.10, n. 3, p. 282-290, 1970.

OLIVEIRA, Marquis H.C. **Estimativa do Teor de Água no Solo em Bacia hidrográfica com Redes neurais Artificiais Utilizando Fatores Físicos e Climáticos**. Porto Alegre: UFRGS, 2006. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/109779/000951069.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 31 out. 2017.

OLIVEIRA, Guilherme G.; FLORES, Taísa; BRESOLIN JR. Nestor. Análise do Evento Extremo Hidrológico Ocorrido na Bacia hidrográfica do Rio Forqueta em Janeiro de 2010. **Revista Caderno Pedagógico**, Lajeado, v. 14, n.1, 2017. Disponível em:

<<http://univates.br/revistas/index.php/cadped/article/viewFile/1426/1174>>.
Acesso em: 12 jan. 2018.

OLIVEIRA, Guilherme G.; PEDROLLO, Olavo C.; CASTRO, Nilza M.R.
Simplifying artificial neural network models of river basin behaviour by an automated procedure for input variable selection. **Enineering Aplications of Artificial Intelligence**, n. 40, 2015.

Paulino, R.B. **Modelo AHP aplicado à ocorrência de deslizamentos na Região Nordeste de Santa Catarina**. Curitiba, 107p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, 2013.

PINTO, Roberto C.; PASSOS, Everton; CARNEPARO, Sony C. Considerações a respeito dos Condicionantes Utilizados em Pesquisas Envolvendo Movimentos de massa. **Geoingá: Revista do Programa de Pós-Graduação em Geografia Maringá**. V. 5, n. 1, p. 102-124, 2013.

POUDYAL, Chandra, P.; CHANG, Chandong; OH, Hyun-Joo; LEE, Saro.
Landslide susceptibility maps comparing frequency ratio and artificial neural networks: a case study from the Nepal Himalaya. Environ Earth Sci, 2010.

RAMOS, Anabela; CUNHA, Lúcio; CUNHA, PEDRO, P.; FREITAS, Maria, I.C.
Cartografia de suscetibilidade a movimentos e unidades territoriais de risco à escala regional: o caso da região Figueira da Foz – Nazaré. **Cadernos de Geografia**. n. 30/31 - 2011/2012 Coimbra, FLUC - pp. 269-281.

RECKZIEGEL, Bernadete W. **Levantamento dos Desastres Desencadeados por Eventos Naturais Adversos no Estado do Rio Grande do Sul no Período de 1980 a 2005**. Santa Maria: UFSM, 2007. 284 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Programa de Pós-graduação em Geografia, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007. Disponível em: <http://w3.ufsm.br/ppggeo/files/dissertacoes_06-11/BernadeteReckziegel.pdf>. Acesso em: 10 set. 2017.

RELATÓRIO DOS DANOS MATERIAIS E PREJUÍZOS DECORRENTES DE DESASTRES NATURAIS NO BRASIL EM SANTA CATARINA: 1995-2014. Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. **Ceped**. Organização: Rafael Schadeck. Florianópolis: CEPED UFSC, 2016. Disponível em: <http://www.ceped.ufsc.br/wp-content/uploads/2016/04/Relat%C3%B3rio-Danos-e-Preju%C3%ADzos-SC_290316-BAIXA.pdf>. Acesso em: 14 jan. 2018.

REMPEL, Claudete. **Aplicação do Sensoriamento Remoto da Determinação da Evolução da Mata Nativa da Bacia hidrográfica do Rio Forqueta - RS, entre 1985 e 1995**. 2000. UFRGS, 2000, 85 f. Tese (Mestrado em

Sensoriamento Remoto) - Área de Concentração em Análise Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/11232>>. Acesso em: 11 jan. 2018.

RIFFEL, Samuel, E.; GUASSELLI, Laurindo A. Mapeamento de áreas suscetíveis a movimentos e zoneamento de risco no município de três Coroas – RS. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 2, 2016.

RIFEEL, Eduardo, S.; GUASSELLI, Laurindo A.; BRESSANI, Luiz A. Desastres Associados à Movimento de massa: uma revisão de literatura. **Bol. Goia. Geogr.** (Online). Goiânia, v. 36, n. 2, p. 285-101, mai./jul. 2016. Disponível em: <<https://revistas.ufg.br/bgg/article/viewFile/42796/21417>>. Acesso em: 10 jan. 2018.

RIFFEL, Samuel, E.; RUIZ, Luis, F. C.; GUASSELLI, Laurindo A. Mapeamento de Suscetibilidade à movimentos a partir de Mineração de Dados e Modelo Shalstab. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 68/9, Edição Especial Movimentos de Massa e Processos Erosivos. Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto, 2016.

ROCHA, André P.; SCHULER, Carlos A.B. Avaliação Espaço-Temporal da Suscetibilidade à Movimentos de Massa Utilizando Ortofotocartas e Modelagem Espacial Multicritério na Dinâmica de Áreas de Risco nas Microrregiões do Jordão e Ibura, Recife – PE. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 68/9, Edição Especial Movimentos de Massa e Processos Erosivos. Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto, 2016.

ROSENBLATT, F. The Perceptron: a Probabilist Model for Information Storage and Organization in the Brain. **Psychological Review**, v. 65, n. 6, 1958. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.335.3398&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: 12 dez. 2017.

RUMELHART, D. E., HINTON, G. E., WILLIAMS, R. J. Learning representations by backpropagating errors. **Nature** 323, 533–536, 1986.

SAITO, Silvia. **Estudo analítico da suscetibilidade a movimentos e quedas de blocos no maciço central de Florianópolis - SC**. Florianópolis: UFSC, 2004. 133 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Programa de Pós-graduação em Geografia, Departamento de Geociências, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/87389/212600.pdf?squence=1>>. Acesso em: 15 set. 2017.

SANTOS, Eulanda M. **Teoria e Aplicação de Support Vector Machines à Aprendizagem e Reconhecimento de Objetos Baseado na Aparência**.

Campina Grande: UFP, 2002. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Informática, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 2002. Disponível em: <http://docs.computacao.ufcg.edu.br/posgraduacao/dissertacoes/2002/Dissertacao_EulandaMirandadosSantos.pdf>. Acesso em: 31 out. 2017.

SANTOS, Rozely F. **Vulnerabilidade Ambiental**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2007.

SIDLE, R. C.; TAYLOR, D.; LU, X. X.; ADGER, W. N.; LOWE, D. J.; LANGE, W. P.; NEWNHAM, R. M.; DODSON, J. R. **Interactions of natural hazards and society in Austral-Asia: evidence in past and recent records**. Quaternary International, n.118-119, p.181-203, 2004.

SILVEIRA, Rodrigo M. **Comportamento Geotécnico de um Solo Coluvionar de São Vendelino (RS)**. Porto Alegre: UFRGS, 2008. 301 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/13519>>. Acesso em: 12 nov. 2017.

SIRTOLI, Angelo E.; SILVEIRA, Claudinei T.; MANTOVANI, Luiz E.; SIRTOLI, Ana R.A.; OKA-FIORI, Chisato. Atributos do Relevo Derivado de Modelo Digital de Elevação e suas Relações com Solos. **Scientia Agraria**, Curitiba, v.9, n.3, p.317-329, 2008.

SOBREIRA, F. G.; SOUZA, L. A. Cartografia geotécnica aplicada ao planejamento urbano. **Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental**, São Paulo, n. 2, p. 79-97. 2012.

SONG, Yan, H. **Formation and Stability os the Sky Pond Landslide dam, China**. Advanced Materials Research, Vols. 243-249, pp. 3189-3200, 2011.

TOMINAGA, Lídia, K. **Avaliação de Metodologias de Análise de Risco a Movimentos**: aplicação de um ensaio em Ubatuba, SP. São Paulo: USP, 2007, 220 f. Tese (Doutorado) - Departamento de Geografia, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/8/8135/tde-18102007-155204/pt-br.php>>. Acesso em: 15 jan. 2018.

TOMINAGA, Lídia, K.; SANTORO, Jair; AMARAL, Rosangela. **Desastres naturais**: conhecer para prevenir. 2. ed. São Paulo: Instituto Geológico, 2012.

VANACÔR, Roberto N. **Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento Aplicados ao Mapeamento das Áreas Suscetíveis à Movimento de Massa na Região Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: UFRGS, 2006, 123 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Programa de

Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006. Disponível em:

<<http://www.ufrgs.br/srm/ppgsr/publicacoes/Dissert.RobertoVanacor.pdf>>.

Acesso em: 22 out. 2017.

Vapnik VN. **The nature of statistical learning theory, 2nd edn.** Springer, New York Varnes DJ (1978) Slope movement types and processes. In: Schuster RL, Krizek RJ (eds) Landslides analysis and control. National Academy of Sciences, New York, pp 12–33, 1999.

VARNES, David J. **Landslides types and process.** In: EKEL, E. B. (Org.) Landslides and engineering practice. Washington: National Academy of Sciences, 1958. Cap. 2.

VARNES, David J. **Landslides, analysis and control.** Special Report 176, National Academy of Sciences, cap. II, 1978.

WIDROW, B., HOFF, M.E. **Adaptive Switching Circuits. 4.** 1960 IRE WESCON Convention Record, New York: IRE Part, pp. 96–104, 1960.

WHITE, G. F. **Natural hazards research:** concepts, methods and policy implications. In: WHITE, G. F. Natural hazards: local, national, global. New York: Oxford Univ. Press, 1974, p.3-16.

XU, Chong; DAI, Fuchu; XU, Xiwei; LEE, Yuan H. GIS-based support vector machine modeling of earthquake-triggered landslide susceptibility in the Jianjiang River watershed, China. **Geomorphology**, n. 145, 2011.

YEON, Young-Kwang; HAN, Jong-Gyu; TYU, Keun H. Landslide Susceptibility in Injae, Korea, Using a Decision Tree. **Engineering Geology**, n. 116, 2010.

YILMAZ, Isik. **A case study from Koyulhisar (Sivas-Turkey) for landslide susceptibility mapping by artificial neural networks.** Bull Eng Geol Environ., 2009.